

OTOMOTİV ENDÜSTRİSİNDE KULLANILAN U FORMLU DP SACLARIN GERİ  
ESNEME DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

Berna TUNALI

Kütahya Dumlupınar Üniversitesi  
Lisansüstü Eğitim Öğretim ve Sınav Yönetmeliği Uyarınca  
Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalında  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
Olarak Hazırlanmıştır.

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Mehmet ERDEM

Temmuz-2019

## KABUL VE ONAY SAYFASI

Berna TUNALI tarafından hazırlanan 'OTOMOTİV ENDÜSTRİSİNDE KULLANILAN U FORMLU DP SACLARIN GERİ ESNEME DAVRANIŞININ İNCELENMESİ' adlı tez çalışması, aşağıda belirtilen jüri tarafından Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek OY BİRLİĞİ / ~~OY ÇOKLUĞU~~ ile Kütahya Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

18/07/2019

Prof. Dr. Önder UYSAL  
Enstitü Müdürü, Fen Bilimleri Enstitüsü

.....

Prof. Dr. Ramazan KÖSE  
Anabilim Dalı Başkanı, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı



Dr. Öğr. Üyesi Mehmet ERDEM  
Danışman, Makina ve Metal Teknolojileri Bölümü



### Sınav Komitesi Üyeleri

Prof. Dr. Özer AYDIN  
Makine Mühendisliği Bölümü, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi



Doç. Dr. Kadir GÖK  
Makine Mühendisliği Bölümü, Manisa Celal Bayar Üniversitesi



Dr. Öğr. Üyesi Mehmet ERDEM  
Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi



## ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

Bu tezin hazırlanmasında Akademik kurallara riayet ettiğimizi, özgün bir çalışma olduğunu ve yapılan tez çalışmasının bilimsel etik ilke ve kurallara uygun olduğunu, çalışma kapsamında teze ait olmayan veriler için kaynak gösterildiğini ve kaynaklar dizininde belirtildiğini, Yüksek Öğretim Kurulu tarafından kullanılmak üzere önerilen ve Kütahya Dumlupınar Üniversitesi tarafından kullanılan İntihal Programı ile tarandığını ve benzerlik oranının %13 çıktığını beyan ederiz. Aykırı bir durum ortaya çıktığı takdirde tüm hukuki sonuçlara razı olduğumuzu taahhüt ederiz.

Dr. Öğr. Üyesi Mehmet ERDEM

Berna TUNALI



## OTOMOTİV ENDÜSTRİSİNDE KULLANILAN U FORMLU DP SACLARIN GERİ ESNEME DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

Berna TUNALI

Makine Mühendisliği, Yüksek Lisans Tezi, 2019

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Mehmet ERDEM

### ÖZET

Otomotiv endüstrisinde geniş bir kullanım alanına sahip sac metal malzemeler çeşitli şekillendirme yöntemleriyle üretilebilmektedir. Üretilen parçalar çalışacağı yer dikkate alınarak istenilen toleranslar dahilinde olmalıdırlar. Bu tolerans değerlerini elde etme sırasında bazı problemlerle karşılaşmaktadır ve bunlardan en önemlisi geri esnemedir. Bu çalışmada, otomotiv endüstrisinde sıkça kullanılan U formulu saclarda şekillendirme işlemi sonrası oluşan geri esneme davranışı sayısal ve deneysel olarak incelenmiştir.

Geri esneme davranışı; 1; 1,6 ve 2 mm kalınlıklarda, farklı kalitede sac malzemelerde (DP450, DP600, DP800, DP1000), 5°, 10° ve 15° kalıp açıklığında ve farklı dişi kalıp erkek yarıçap değerlerinde (R6, R8, R10, R12, R14) incelenmiştir. DP (çift fazlı) malzemeleri kıyaslamak ve geri esneme ölçümlerini yapabilmek adına sonlu elemanlar analiz (SEA) tabanlı çözüm yapan Autoform programından yararlanılmıştır. Bu parametreler ışığında sacın geri esneme davranışına etki eden faktörler, deneysel ve sayısal farklar grafiklerle açıklanmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda deneysel ve sayısal sonuçların birbirine yakın olduğu ve geri esneme miktarının parametrelere bağlı olarak değiştiği tespit edilmiştir.

**Anahtar Sözcükler:** Geri Esneme, Sac Şekillendirme, Sıvama, Sonlu Elemanlar Metodu, U Formlu Sac Parçalar

# **INVESTIGATION of SPRINGBACK BEHAVIOUR of DUAL PHASE STEELS in U SHAPED PARTS USED on AUTOMOTIVE INDUSTRIES**

Berna TUNALI

Mechanical Engineering, M.S. Thesis, 2019

Thesis Supervisor: Assist. Prof. Dr. Mehmet ERDEM

## **SUMMARY**

Sheet metal materials which have a wide usage area in automotive industry can be produced by various forming methods. Produced parts should be within the required tolerances considering the place where they will work. Some problems are encountered in obtaining these tolerance values, and the most important one is spring back. In this study, the spring back behavior of the U-shaped parts, which are frequently used in the automotive industry, were investigated numerically and experimentally.

The spring-back behavior was investigated; 1, 1,6 and 2 mm thickness, different quality sheet metals (DP450, DP600, DP800, DP1000), 5°, 10° ve 15° die clearance and different die punch radius values (R6, R8, R10, R12, R14). In order to compare the DP (dual-phase) sheet materials and to make the spring back measurements, a finite element analysis program (Autoform) was used. In the light of these parameters, experimental and numerical differences are shown graphically. As a result of the studies, it was determined that the experimental and numerical results were close to each other and the amount of spring back changed according to the parameters.

**Key Words:** Drawing, Finite Element Method, Sheet Metal Forming, Spring back, U Form Sheet Metals

## TEŞEKKÜR

Çalışmalarım süresince her türlü desteği sağlayan, bilgi ve tecrübelerini esirgemeyen danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Mehmet ERDEM'e sonsuz saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmasının deneylerinin yapımında ve teçhizat temininde bana imkan sağlayan Beyçelik Gestamp Teknoloji ve Kalıp Merkezi'ne teşekkür ederim. Her türlü desteklerini ve tecrübelerini esirgemeyen, kendilerinden çok şey öğrendiğim, Proses ve Tasarım Müdürü Sayın Selçuk KERVANCI'ya ve Proses Yöneticisi Sayın İlkay KOÇ'a teşekkürlerimi sunarım. Sac temini ve ölçümler konusunda yardımlarından dolayı Arge Uzmanları Sayın Tuğçe TURAN ABİ ve Sayın Ahmet YILMAZ'a teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca tez çalışmam süresince göstermiş oldukları anlayıştan ve destekten dolayı aileme ve arkadaşlarıma teşekkürü bir borç bilirim.

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET .....	v
SUMMARY .....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	xv
1. GİRİŞ.....	1
2. ÜRETİM YÖNTEMLERİ.....	8
2.1. Döküm Yolu ile Şekillendirme.....	8
2.2. Talaşlı İmalat.....	10
2.3. Plastik Şekil Verme Yöntemleri .....	14
2.3.1. Dövme .....	14
2.3.2. Haddelme.....	16
2.3.3. Ekstrüzyon.....	16
2.3.4. Çekme.....	17
2.3.5. Sac işleme yöntemleri.....	17
2.4. Malzemelerin Mekanik Özellikleri.....	23
2.4.1. Gerilme çeşitleri ve bileşik gerilme .....	23
2.4.2. Çekme deneyi .....	24
2.4.3. Gerilme – şekil değiştirme eğrisi .....	25
2.4.4. E, G ve $\nu$ arasındaki İlişki .....	36
3. ÇİFT FAZLI ÇELİKLER.....	40
3.1. Çift Fazlı Çeliklerin Mekanik Özellikleri .....	41
3.1.1. Akma mukavemeti.....	42
3.1.2. Çekme mukavemeti .....	44
3.1.3. Elastiklik modülü.....	45
3.1.4. Süneklik.....	45
3.1.5. Üniform uzama ve kopma uzaması.....	46
4. GERİ ESNEME .....	48
4.1. Sonlu Elemanlar Metodu.....	51

## İÇİNDEKİLER (devam)

	<b><u>Sayfa</u></b>
5. MATERYAL VE METOT.....	56
5.1. Deneysel Çalışma.....	58
5.2. Sayısal Çalışma .....	63
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	70
KAYNAKLAR DİZİNİ .....	89
<b>EKLER</b>	
Ek-1 Kalıp Montajının Teknik Resmi	
Ek-2 Alt Grup Montajının Teknik Resmi	
Ek-3 Üst Grup Montajının Teknik Resmi	
Ek-4 Tasarımda Kullanılan Kamaların Teknik Resim Detayları	
Ek-5 Tasarımda Kullanılan Dayamaların Teknik Resim Detayları	
Ek-6 Tasarımda Kullanılan Pot Çemberinin Teknik Resim Detayları	
Ek-7 Tasarımda Kullanılan Dişi Çeliğin Teknik Resim Detayları	
Ek-8 Tasarımda Kullanılan İnsert Çeliğin Teknik Resim Detayları	
Ek-9 Tasarımda Kullanılan Dişi Tablanın Teknik Resim Detayları	
Ek-10 DP450 Kalitesindeki Sacların Parametrelere Göre Sayısal ve Deneysel Ölçümleri ve Farkları	
Ek-11 DP600 Kalitesindeki Sacların Parametrelere Göre Sayısal ve Deneysel Ölçümleri ve Farkları	
Ek-12 DP800 Kalitesindeki Sacların Parametrelere Göre Sayısal ve Deneysel Ölçümleri ve Farkları	
Ek-13 DP1000 Kalitesindeki Sacların Parametrelere Göre Sayısal ve Deneysel Ölçümleri ve Farkları	
Ek-14 Kalıp Proses ve Tasarımında Kullanılan Genel İşleyiş	

## ÖZGEÇMİŞ



## ŞEKİLLER DİZİNİ

<b><u>Sekil</u></b>	<b><u>Sayfa</u></b>
1.1. Yeni nesil araçlarda kullanılan malzemeler.....	2
2.1. Çelik sac üretimde kullanılan bir tesisin genel olarak üretim akışı.....	8
2.2. Yüksek mukavemetli çelikler. ....	10
2.3. Başlıca tornalama işlemleri. ....	12
2.4. (a) Çevresel ve (b) Alın Frezeleme işlemleri . ....	12
2.5. (a) Vargelleme ve (b) Planyalama İşlemleri. ....	13
2.6. Taşlama tezgahı.....	13
2.7. Açık kalıpta dövme işlemi.....	15
2.8. Kapalı kalıpta çapaklı dövme işlemi.....	15
2.9. Kapalı kalıpta çapaksız dövme işlemi . ....	15
2.10. Haddemeleme işlemi.....	16
2.11. Ekstrüzyon işlemi.....	16
2.12. Çekme işlemi.....	17
2.13. Kesme işleminin şematik çizimi.....	18
2.14. Sıvama işleminin gösterimi. ....	19
2.15. Sıvamada oluşan farklı gerilme bölgeleri .....	20
2.16. En yaygın bükme işlemleri. ....	21
2.17. V bükme işleminin safhaları.....	21
2.19. Kenar bükme işlemi .....	23
2.20. Gerilme çeşitleri. ....	24
2.21. 20KN bilgisayar servo kontrol laboratuvar test cihazları universal çekme test cihazı .....	25
2.22. Düşük karbonlu çeliğe ait $\sigma$ - $\epsilon$ grafiği .....	26
2.23. Gerilme altındaki uzamanın miktarı .....	27
2.24. Cottrell atmosferinden dolayı gerilmenin tekrarlı olarak iniş-çıkış tavrı sergilediği akma uzaması bölgesi.....	28
2.25. Dökme demir gibi belirgin bir akma göstermeyen gevrek malzemelerde Akma mukavemet.....	29
2.26. Uygulana yükün kaldırılmasından sonra doğrusal elastik şekil değişimi .....	30
2.27. Doğrusal olmayan elastik davranış gösteren malzemelerde Tanjant ve Sekant modülleri .	30
2.28. Kuvvetli ve zayıf bağlara sahip malzemede kuvvetin atomlar arası mesafeye göre değişimi (Elastisite modülünün değişimi). ....	31
2.29. Dairesel kesitli bir numunede poisson oranının belirlenmesi.....	32

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.30. Kare kesitli bir numunede poisson oranının belirlenmesi .....	33
2.31. Kare kesit .....	34
2.32. $\sigma$ - $\epsilon$ grafiğinde tokluğun belirlenmesi .....	35
2.33. $\sigma$ - $\epsilon$ grafiğinde rezilyansın belirlenmesi .....	35
2.34. Düşük karbonlu çelik ve yay çeliğinin rezilyans davranışları .....	36
2.35. Eksenel olarak yüklenen homojen çubuk .....	36
2.36. Eksenel çekme kuvvetine maruz kalmış çubuğun kuvvet yönüne dik doğrultuda daralması.....	37
2.37. Çok eksenli yükleme durumunda birim elemanın deformasyonu .....	37
2.38. Birim eleman.....	38
2.39. Birim elamana uygulanan kayma gerilmesi.....	38
3.1. Peugeot 308'de DP çeliği kullanımı: (a) 2008 model 1. nesil, (b) 2014 model 2. Nesil. ....	40
3.2. Mühendislik gerilmesi – mühendislik gerinimi eğrisinin temel nitelikleri .....	42
3.3. Çift fazlı çelik ve yüksek mukavemetli düşük alaşımlı çeliklerin uzama ve gerilme ilişkisi .....	43
3.4. Martenzit hacim oranının çekme mukavemetine etkisi .....	45
3.5. Kalıntı östenit hacim oranının birim şekil değişimi üzerindeki etkisi.....	46
3.6. Bir çekme numunesinde ortaya çıkan yayılı ve yerel boyunlanma .....	47
4.1. Sünek bir metaldeki geri esnemenin akma diyagramı üzerinde gösterilişi .....	48
4.2. Bükme işlemi sonrasında oluşan geri esneme .....	49
4.3. Eğrilerin küçük çizgilere bölünmesi. ....	52
4.4. Daireyi elemanlara bölmek. ....	52
5.1. Şekillendirmede kullanılan deney tasarımı parametreleri. ....	56
5.2. Zwick Z100 akma çekme test cihazı. ....	57
5.3. Test numunesi. ....	57
5.4. Sıvama kalıbının genel görünümü. ....	59
5.5. Sıvama kalıbının alt kalıp görünümü ve kullanılan malzemeler. ....	59
5.6. Sıvama kalıbının üst kalıp görünümü ve kullanılan malzemeler. ....	60
5.7. Sıvama kalıbının montaj sonrası görüntüsü.....	61
5.8. MTP401 nolu 600 Tonluk pres ve kalıbın görüntüsü. ....	61
5.9. Kalıptan çıkan parçaların bazıları. ....	62

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
5.10. Atos ölçüm cihazı.....	62
5.11. Atos viewer programında simülasyon ve deney sonuçlarının karşılaştırılması.....	63
5.12. Kalıp elemanlarının ve sac malzemenin pozisyonu.....	64
5.13. Autoform R8 programının ara yüzü.....	65
5.14. Parça üzerindeki mesh görüntüsü.....	65
5.15. Autoform R8 yazılımının girdileri ve çıktıları.....	66
5.16. Autoform R8 de tanıtılan operasyon yüzeyleri.....	66
5.17. Sıvama işleminin operasyon aşamaları.....	67
5.18. Simülasyondan çıkan parçanın geri esnemedi önceki ve sonraki hali.....	68
5.19. Çalışmada kullanılan diğer parametrelerin gösterimi.....	68
5.20. Şekillendirme Sınır Diyagramının genel açıklaması (Kahraman, 2008).....	69
6.1. Şekillendirilmiş deney numunelerinin bazıları.....	70
6.2. DP450 kalitesindeki sacların sayısal geri esneme değerleri ve parametrelerin etkileri.....	71
6.3. 5 derece kalıp açıklığında DP450 kalitesindeki saclarda yarıçapın geri esneme değerlerine etkisi.....	72
6.4. 10 derece kalıp açıklığında DP450 kalitesindeki saclarda yarıçapın geri esneme değerlerine etkisi.....	73
6.5. 15 derece kalıp açıklığında DP450 kalitesindeki saclarda yarıçapın geri esneme değerlerine etkisi.....	74
6.6. DP600 kalitesindeki sacların sayısal geri esneme değerleri ve parametrelerin etkileri.....	75
6.7. 5 derece kalıp açıklığında DP600 kalitesindeki saclarda yarıçapın geri esneme değerlerine etkisi.....	76
6.8. 10 derece kalıp açıklığında DP600 kalitesindeki saclarda yarıçapın geri esneme değerlerine etkisi.....	77
6.9. 15 derece kalıp açıklığında DP600 kalitesindeki saclarda yarıçapın geri esneme değerlerine etkisi.....	78
6.10. DP800 kalitesindeki sacların sayısal geri esneme değerleri ve parametrelerin etkileri.....	79
6.11. 5 derece kalıp açıklığında DP800 kalitesindeki saclarda yarıçapın geri esneme değerlerine etkisi.....	80
6.12. 10 derece kalıp açıklığında DP800 kalitesindeki saclarda yarıçapın geri esneme değerlerine etkisi.....	81

**ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)**

<b><u>Sekil</u></b>	<b><u>Sayfa</u></b>
6.13. 15 derece kalıp açıklığında DP800 kalitesindeki saclarda yarıçapın geri esneme değerlerine etkisi.....	82
6.14. DP1000 kalitesindeki sacların sayısal geri esneme değerleri ve parametrelerin etkileri. ...	83
6.15. 5 derece kalıp açıklığında DP1000 kalitesindeki saclarda yarıçapın geri esneme değerlerine etkisi.....	84
6.16. 10 derece kalıp açıklığında DP1000 kalitesindeki saclarda yarıçapın geri esneme değerlerine etkisi.....	85
6.17. 15 derece kalıp açıklığında DP1000 kalitesindeki saclarda yarıçapın geri esneme değerlerine etkisi.....	86
6.18. Minitab ana etki grafiği.....	87

## ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Metalürjik özelliklerine bağlı olarak çelik sac malzemelerin sınıflandırılması .....	9
5.1. Şekillendirme işleminde kullanılan işlem parametreleri .....	56
5.2. Kullanılan sac malzemelerin mekanik özellikleri .....	58
5.3. Sac metal malzemelerin kimyasal içerikleri .....	58



## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
c	Zimba ile kalıp arasındaki boşluk
e	% nominal gerinim
E	Elastisite (Young) Modülü
K	Geri esneme faktörü
M	Martenzit
n	Pekleşme üsteli
R	Bükme yarıçapı
Rd	Kalıp yarıçapı
Rp	Zimba yarıçapı
S	Nominal gerilme
t	Sac kalınlığı
v	Poisson oranı
$\varepsilon$	Birim şekil değiştirme
$\varepsilon_u$	Maksimum uniform gerinim
$e_f$	Kopma uzaması
$\Delta\theta$	Geri esneme açısı
$\alpha$	Ferrit
$\gamma$	Östenit
$\theta$	Bükme açısı
$\theta'$	Bükme önce zimba açısı
$\sigma$	Gerilme
$\sigma_{ak}$	Akma mukavemeti
$\sigma_{\zeta}$	Çekme mukavemeti
$\tau_{max}$	Maksimum kayma gerilmesi
$\sigma_0$	Orantı sınırı
$\sigma_e$	Elastisite sınırı
G	Kayma modülü

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklama</u>
SEA	Sonlu elemanlar analizi
AHSS	Advanced High Strength Steels
C	Karbon
CAD	Computer Aided Design
CMn	Karbon Manganezli Saclar (Carbon Manganese Steels)
CP	Kompleks Fazlı Saclar (Complex Phase Steels)
Cr	Krom
DIN	Deutsches Institut für Normung
DMS	Düşük Mukavemetli Saclar
DP	Çift Fazlı Saclar (Dual Phase Steels)
DKP	Soğuk Haddelenmiş Sac
EN	Euronorm
Fe	Demir
GYMÇ	Geliştirilmiş Yüksek Mukavemetli Çelikler
HSLA	Yüksek Mukavemetli Düşük Alaşımli Saclar (High Strength Low Alloy Steels)
HSS	Yüksek Mukavemetli Saclar (High Strength Steels)
IF	Arayer Atomsuz Saclar (Intersititial - Free Steels)
IF-HS	Yüksek Mukavemetli Arayer Atomsuz Saclar (High Strength Intersititial - Free Steels)
IS	İzotropik Çelikler (Isotropic Steels)
ISO	International Organization for Standardization
LSS	Düşük Mukavemetli Saclar (Low Strength Steels)
MART	Martenzitik Saclar (Martenzitic Steels)
MILD	Yumuşak Saclar (Mild Steels)
Mn	Mangan
Mo	Molibden
Ni	Nikel
P	Fosfor
S	Kükürt

**SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)**

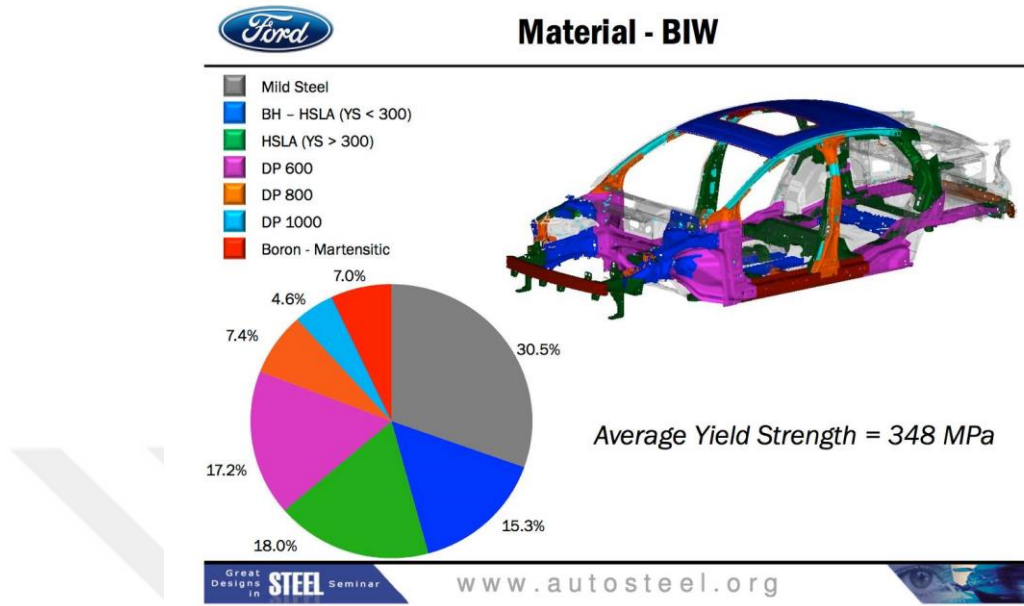
<b><u>Kısaltmalar</u></b>	<b><u>Açıklama</u></b>
SEM	Sonlu Elemanlar Metodu
Si	Silisyum
STL	Standard Triangle Language
ŞSD	Şekillendirme Sınır Diyagramı (Forming Limit Diagram, FLD)
TRIP	Dönüşümle Oluşturulan Plastisite Saclar (Transformation Induced Plasticity Steels)
TWIP	Twinning Induced Plasticity
V	Vanadyum
YMS	Yüksek Mukavemetli Saclar
UHSS	Ultra High Strength Steels



## 1. GİRİŞ

Günümüzde artan teknolojik gelişmeler diğer birçok sektörde olduğu gibi sac metal şekillendirme sektöründe de talep edilen ihtiyaçların artmasına ve gelişmesine yol açmıştır. Günlük hayatta kullanılan çoğu eşyanın yapımında sac malzemelerden yararlanılmaktadır. Otomotiv sektöründen havacılığa kadar birçok alanda bu malzemelerin kullanıldığı bilinmektedir. Üründen istenilen özelliklere bağlı olarak malzeme çeşitliliği oldukça geniştir. Otomobillerin güvenlik donanımları dışında kalan bölgelerde kullanılan yumuşak (sünek) sac malzemelerden, uçak motor gövdelerinde kullanılan yüksek mukavemetli saclara kadar beklentiler doğrultusunda saclar tercih edilebilmektedir. Son yıllarda artan enerji tüketimi ve çevreyi koruma politikalarının ardından motorlu taşıtlarda kütle azaltılması önem kazanmıştır. Taşıt kütlelerinin %75'e yakını çelik malzemeler oluşturduğu için kütle azaltılmasında kullanılan malzemeler çok önemlidir.

Yüksek mukavemetli sac malzemeler yerine kullanılan çift fazlı (dual phase) sac malzemeler kolay şekil alabilirliği ve düşük maliyeti sebebiyle tercih edilmeye başlanmıştır. Günümüzde tasarlanan araçların hafif olması ile birlikte dayanıklı olması da beklenmektedir. Çift fazlı sac malzemeler yüksek dayanım ve şekillendirilme kabiliyetleri nedeniyle otomotiv gövde, panel ve kaporta parçaları için üretilmektedir. Geliştirilen bu çelik kalitesi yerine geleneksel yüksek mukavemetli ya da yumuşak çeliklerin herhangi bir kalitesi kullanıldığında ortaya çıkan en büyük problem dayanım ve şekillendirilebilirlik özelliklerinin uyumsuzudur. Bu amaçla geliştirilen yüksek mukavemetli sac malzemeler daha ince kesitli malzeme kullanarak azalan ağırlığa karşın, artan mekanik özellikleri ile son derece önemli bir malzeme konumuna gelmiştir. Şekil 1.1'de görüldüğü gibi yeni nesil araçlarda kullanılan malzemeler kolay şekillendirilebilir olmasının yanı sıra sağlam da olmalıdır.



**Şekil 1.1.** Yeni nesil araçlarda kullanılan malzemeler (<http://www.autosteel.org>).

Sac metal şekillendirme metotları; sıvama, kesme, bükme ve ütüleme olarak sınıflandırılmaktadır. Sac malzemelerin şekillendirilmesinde ürünü ortaya çıkarmanın yanı sıra düşük maliyet, zaman ve doğruluk (ölçüsellik) sektörde öne çıkmak için önemli etkenlerdendir. Bu etkenlerden ölçüselligi en fazla etkileyen parametre olan geri esneme (springback) problemi tezin konusunu oluşturmaktadır.

Şekillendirme sürecinde malzeme özelliklerine veya ortam değişkenlerine bağlı olarak parçada hatalar meydana gelebilmektedir. Bu hatalardan en önemlisi parçanın montajını etkilemesi ve nihai üründe istenen tolerans değerlerine giremediği için sorun oluşturan geri esneme problemidir. Bu hatanın pres altında çözülmeye çalışılması fazla işçilik, zaman kaybı ve maliyete sebep olmaktadır. Bu nedenle sonlu elemanlar analiz (SEA) yöntemini içeren programlar kullanılarak geri esneme probleminin önceden tahmin edilmesi zaman ve maliyet açısından önem teşkil etmektedir. Bu çalışmada U formlu parçalarda şekillendirme sonrası oluşan gerisenemenin analiz programlarından Autoform ile önceden tahmini ve karşılaştırılması, ayrıca U formlu parçalar için geri esnemenin etken parametreleri araştırılmıştır.

### Literatür Araştırması

Sac şekillendirmede kullanılan yöntemlerden U formlu parçaların şekillendirme sonrası oluşan geri esneme optimizasyonunun yapıldığı tez çalışmasının bu bölümünde, sac parçalarda geri esneme üzerine yapılan çalışmalar incelenmiş ve özetlenmiştir.

Pourboghraat ve Chu yapmış oldukları çalışmalarında sonlu elemanlar metodu kullanarak geri esnemenin hesaplanmasını membran kodları kullanarak sağlamışlardır. Ters yükleme için kinematik pekleşmeden yararlanarak, doğrultulmuş elemanların bükülme gerginliğini hesaplamışlardır. Sacın şekli, kıvrılması, gerilmesi ve kalınlığının ne kadar etkili olduğunun tahminini vermesi beklenen sonuçlar ile deneysel sonuçları karşılaştırmışlardır (Pourboghraat ve Chu, 1995).

Alüminyum ve çelik saclar arasında kıyas yapmak ve geri esneme miktarlarını belirlemek için çeşitli bükme operasyonlarını SEA metodunu kullanarak inceleyen Esat, analiz sonuçları ile literatürdeki formüllerin uyumlu olduğunu gözlemlemiştir (Esat, 2002).

Numisheet sonlu elemanlar analiz programı yardımı ile U bükme yöntemi kullanarak sac parçaların şekillendirilmesinde geri esnemeyi etkileyen faktörleri inceleyen Xu ve arkadaşları, sönümlenme değerinin, entegrasyon noktalarının, sac ağ büyüklüğü sayısının ve delme hızının geri esneme simülasyonunda doğruluğunu inceleyerek makul değerler önermişlerdir (W.L. Xu vd., 2004).

Yıldız ve Kırılı, şekillendirme yöntemlerinden sıvama metodunu kullanarak yaptıkları çalışmada şekillendirme sonrası oluşabilecek problemleri belirlemiş ve sonlu elemanlar metodu ile çözümler geliştirmişlerdir. Soğuk şekillendirme yöntemi için deneysel ve sayısal verilerin tutarlı olduğu sonucuna varmışlardır (Yıldız ve Kırılı, 2004).

Gomes ve arkadaşları, geliştirilmiş yüksek mukavemetli (UHSS) çeliklerde anizotropinin ve akma mukavemetinin geri esneme üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Farklı hadde yönlerindeki (0°, 45°, 90°) saclarla, izotropik von-Mises, 3 parametrelili Barlat ve Hill akma kriterlerini kullanarak simülasyonlar gerçekleştirmişlerdir. Hadde açısındaki artış ile akma gerilmesinin arttığını ve bu durumun hadde açısına bağlı geri esnemeyi arttırdığını ortaya koymuşlardır. Yapılan çalışmalara göre Barlat modelinin deneysel sonuçlara en yakın değerde olduğunu gözlemlemiştir (Gomes vd., 2005).

Sonlu elemanlar metodunda malzeme özellikleri ve sürtünme katsayısını kullanarak gerçekleştirdikleri simulasyonlarla baskı plakasının duvar kalınlığına etkisini inceleyen Demirci ve arkadaşları, elde ettikleri sonuçların deneysel verilerle karşılaştırıldığında %90 uyumlu olduğunu gözlemlemişlerdir. Sıvama işleminde kalıp üretilmeden önce karşılaşılabilecek problemleri belirleyip çözüm önerileri sunmuşlardır (Demirci vd, 2005).

Yenice, 2 mm kalınlığında üç farklı sac (DC04, HSLA350, DP600) kullanarak farklı hadde yönlerinde (0°, 45°, 90°), farklı açı (80°, 90°, 100°) ve bükme yarıçaplarında (R2, R4, R6) geri esnemeye olan etkileri incelemiştir. Bükülen parçaların kenar ve orta bölgelerinde farklı davranışlar sergilediğini gözlemlemiştir. Bükme yarıçaplarına bağlı olarak geri esneme değerlerinin malzemelerde farklı sonuçlar oluşturduğunu gözlemlemiştir. En çok farklılığın çift fazlı sac malzemelerde görüldüğü ve bu konunun üzerine araştırmalar yapılması gerektiğini önermiştir (Yenice, 2006).

Arslan yaptığı çalışmasında kalıpla V bükme işleminde oluşan geri esnemeyi sonlu elemanlar metodu kullanarak incelemiştir. Çeşitli kalınlıklardaki bükülen alüminyum sacların geri esneme ve kalıcı şekil değiştirmelerinin analiz sonuçlarıyla reel sonuçlarının uyum içinde olduğunu gözlemlemiştir. Alüminyum saclarda kalınlık artarken geri esnemenin azaldığını ortaya koymuştur (Arslan, 2007).

Tekaslan ve arkadaşları, V bükme sonucu paslanmaz çeliklerde meydana gelen geri esnemeyi incelemişlerdir. Farklı 6 hadde yönü (15°, 30°, 45°, 60°, 75°, 90°) ve 3 farklı sac kalınlığında (0,5; 0,75 ve 1 mm) yapılan deneylerde 4 yöntem kullanmışlardır. İlk iki yöntemde baskı sonrası zımba ile kalıp arasında sac kalınlığı kadar boşluk bırakan Tekaslan ve arkadaşları diğer iki yöntemde ise sac kalınlığını önemsemeden baskı sonrası kalıp ile zımba arasında sac boşluğu bırakmamışlardır. 1. ve 3. yöntemlerde kalıp kapalı olarak 20 sn. sac üzerinde bekletilmiştir. Çalışma sonucunda, zımba yükünün sac üzerinde bekletilmesi ile bükme zamanının artmasına rağmen geri esnemenin azaldığı belirtilmiştir. 20 sn. bekleme ile ortalama 1-3° arasında geri esnemede azalma gözlemlenmiştir. Çalışma sonucunda kalınlık ile bükme açısının geri esnemeyi doğru orantıda etkilediğini vurgulamışlardır (Tekaslan vd., 2008).

H320LA ve 1,1 mm'lik sac malzeme ile yapılan denemelerde konkav kenar bükme işlemleri yapılmış olup presten çıkan parça ile simülasyon sonuçlarını karşılaştıran Ergüy, geri esneme tahmininde %40'a yakın iyileştirmeler sağlamıştır. Bu iyileştirmenin basılan sacdaki konkavlık derinliği ve sonlu elemanlar metodunda kullanılan akma gerilim eğrisine bağlı olduğunu gözlemlemiştir (Ergüy, 2008).

Kılıç yaptığı çalışmasında DP600 sac malzeme kullanarak deneylerde çeşitli hız, genişlik ve kalınlıklardaki V bükme kalıbında bükülen sacların geri esneme davranışını incelemiştir. Sac kalınlığı arttıkça geri esneme miktarının azaldığı, genişliğin ise geri esneme üzerinde çok etkisi olmadığı sonucuna varmıştır. Hız değişimlerine göre geri esneme davranışları; yüksek deformasyon hızında deney sonuçları ve analitik sonuçlar yakın çıkarken, 500 mm/dk hızın altında kalan denemelerde analitik sonuçlar gerçeklikten uzaklaşmıştır. Sonuç olarak analitik modelin tahmin yeteneğinin deneysel sonuçların altında kaldığını yorumlamıştır (Kılıç, 2009).

Özdemir, farklı kalınlıklardaki S235JR sac malzemesini kullanarak 30°, 60° ve 90° zımba açılarında bükme işlemi yapıp geri ve ileri esneme farklılıkları karşılaştırmıştır. Malzemeler soğuk haddelenmiş, menevişlenmiş ve normalize edilmiş olarak denenmiştir. Tüm kalınlık ve bükme açılarında yapılan deneyler sonucu normalize edilen sacların ileri esneme miktarının arttığı tespit edilmiştir. Zımba uç yarıçapı arttıkça ileri esneme azalırken, 30°'lik bükümlerde sac kalınlığı artarken ileri esneme miktarı artmış, 60° ve 90°'lik bükümlerde ileri esneme oranı sac kalınlığıyla ters orantılı olarak bulunmuştur (Özdemir, 2011).

Bekar, yaptığı çalışmasında DP600 sac malzemelerde U bükme ve 7 flanşlı şekil verme işleminden sonra oluşan geri esnemeyi etkileyen en önemli parametre ve bu parametreyi en aza indirmeye yönelik çalışmalar yapmıştır. DP600 malzemede hassasiyet analizi yaparak geri esnemeyi en çok etkileyen parametrenin akma gerilmesi olduğunu bulmuştur. Partiden partiye ve parçadan parçaya varyasyon değerlerini belirleyip akma gerilmesi arttıkça parçadan parçaya geri esneme değişmezken, partiden partiye geri esnemenin arttığını gözlemlemiştir (Bekar, 2011).

Işıктаş, 1; 1,5 ve 2 mm kalınlıklarında DKP (soğuk haddelenmiş sac) ve paslanmaz saclarla yaptığı çalışmada numuneleri 60°, 90° ve 120° kalıp açılarında ve farklı zımba radyüs değerlerinde bükümüştür. Malzeme kalınlığı ve bükme açısı arttıkça geri esnemenin azaldığını, zımba yarıçapı büyüdükçe geri esneme değerinin arttığını gözlemlemiştir (Işıктаş, 2011).

U-kanal büküm, 7 flanş büküm ve S-ray profil büküm yöntemlerinde geri esneme problemini inceleyip telafisini amaçlayan Özer bunun yanı sıra yüksek mukavemetli çeliklerin geri esneme davranışları da incelemiştir (Özer, 2011).

U bükme yöntemindeki geri esnemenin farklı malzemeler üzerindeki etkisini inceleyen Chongthairungruang ve arkadaşları çalışmada 1,4 mm kalınlığındaki JSC270C yumuşak sac

malzeme ile JSC590R ve JSC780Y DP sacları kullanmişlardır. Kinematik pekleşme modelleri olan Hill 1948, YLD2000 ve Yoshida-Uemori kullanılmıştır. Çalışmalar sonlu elemanlar analiz programı olan LS-Dyna'da yapılmıştır. Kullanılan yumuşak ve yüksek mukavemetli tüm saclar için en iyi sonucun Yoshida-Uemori modeli kullanılarak yapılan çalışma olduğunu gözlemlemişlerdir (Chongthairungruang vd., 2013).

V bükme kalıplarında geri esneme davranışını inceleyen Şahin bu çalışmada 3 farklı kalıp açısı kullanarak erkek zimba yarıçapını sabit tutup deney sonuçlarını karşılaştırmıştır. Üç tip sac malzeme (Paslanmaz çelik, DKP ve Alüminyum) ve 3 farklı kalınlıkta numunelerden ölçümler almıştır. Bükme açısı 60°'den 120°'ye arttıkça geri esneme miktarı da artmıştır. Malzeme olarak bakıldığında DKP sac ve paslanmaz çelikte kalınlık arttıkça geri esneme artarken, alüminyumda kalınlık arttıkça geri esnemenin azaldığını gözlemlemiştir (Şahin, 2013).

Uslu yaptığı çalışmasında, 1; 1,5 ve 2 mm kalınlığında farklı kalitelerdeki sac malzemelerin (DP saclar ve daha az mukavemetli saclar) V bükme kalıbındaki geri esneme davranışını incelemiştir. Kalıp açıları 60°, 90° ve 120° olan V bükme kalıbında Autoform programı yardımı ile deney ve analiz sonuçlarını karşılaştırmıştır. Kalıp açısı ve malzeme kalınlığı arttıkça geri esneme azalmıştır. Fakat farklı mukavemetteki malzemelerin akma mukavemeti arttıkça geri esneme artmıştır. Analiz sonuçları ile deney sonuçlarının uyum içerisinde olduğunu gözlemlemiştir (Uslu, 2014).

Gök ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, V bükme kalıplarında geri esneme ile bekleme süresi arasındaki ilişkiyi incelemişlerdir. Bilgisayar ortamında sonlu elemanlar analizi olan Ansys programı kullanılarak yapılan deneylerde bekleme süresindeki artışın geri esneme miktarını düşürdüğünü gözlemlemişlerdir (Gök vd., 2015).

DP600 malzeme sacın gerilme-genleme davranışını inceleyen ve iç yapı görüntüsünü deneysel olarak belirleyen Ergene, iç yapısı incelenerek oluşturulan katı modellerin sonlu elemanlar metodu kullanarak gerilme ve genleme grafiklerini oluşturmuştur. DP600 çeliğinin martenzit fazında gerilmesi daha fazlayken, ferrit fazında genlemelerin daha yüksek olduğunu gözlemlemiştir (Ergene, 2015).

Sönmez, DC04 kalitesinde 0,7 mm kalınlığındaki sac malzeme için açılı kanal sonucu oluşan geri esneme davranışını incelemiştir. Malzeme özelliklerini esas alarak yaptığı çalışmada izotropik ve anizotropik malzeme modellerinin geri esneme üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Bu çalışmaya göre anizotropinin geri esneme tahmininde izotropik malzeme modelinden daha

etkili olduğunu ve çözümdeki tahmin hassasiyetinde daha etkili olduğunu ortaya koymuştur (Sönmez, 2015).

DP600 malzeme kullanarak farklı sac bükme metotlarında geri esneme davranışlarını inceleyen Şen, erkek kalıp yarıçapı ile sac kalınlığının oranı ilişkisi üzerinden fikir vermeye çalışmıştır. Farklı sac kalınlığı, bükme yarıçapı, erkek zımba yarıçapı ve bükme açısındaki değerleri kullanarak çeşitli deneyler yapmıştır. Tüm değerler sabit tutulup bükme yarıçapı arttırıldığında geri esneme artmıştır. Yine tüm diğer değerler sabitken kalınlık artışıyla geri esneme miktarı ters orantılı olarak azalmıştır. Aynı bükme yarıçapı grupları içerisinde bükme açısı arttıkça geri esneme değerlerinin düştüğünü gözlemlemiştir (Şen, 2015).

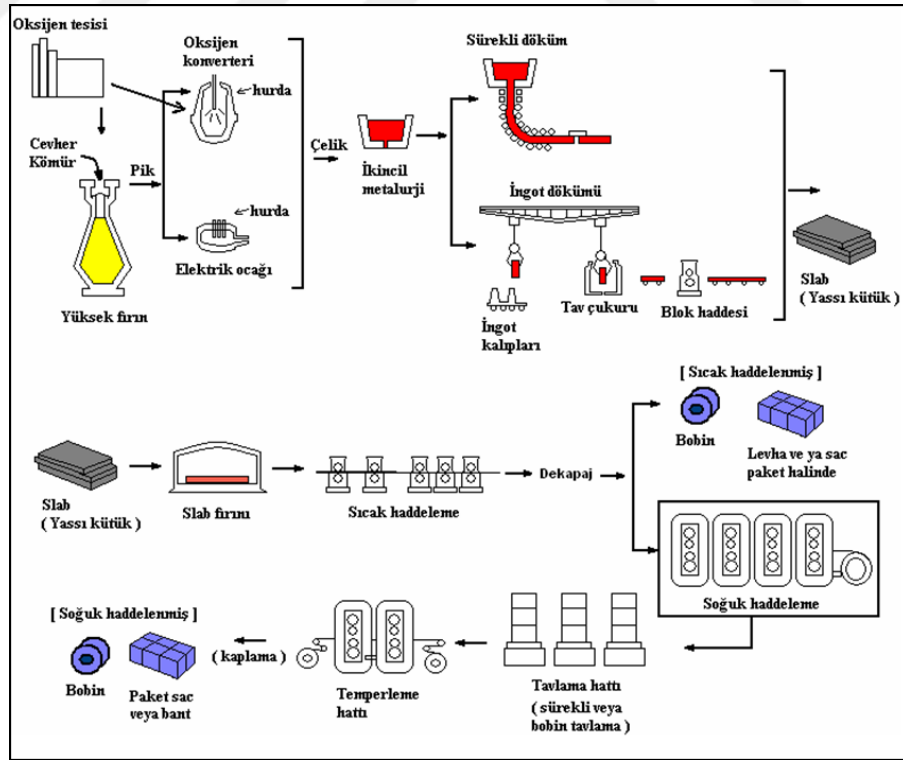


## 2. ÜRETİM YÖNTEMLERİ

### 2.1. Döküm Yolu ile Şekillendirme

Günümüzde teknolojinin artışı ile birlikte sac metal malzemelerin hayatımızdaki kullanım alanları artmıştır. Beyaz eşyalarda, otomobillerde, havacılık sektöründe akla gelebilecek hemen her yerde karşımıza çıkmaktadır. Kullanılacakları yerlere göre istenilen mekanik ve kinetik özelliklere sahip sac metal malzemelerin üretimi yapılabilmektedir. Yapılan bu tez kapsamında, sac malzemelerin çelik türünde olanlarından çift fazlı (DP steels) çeliklerin üzerine yoğunlaşmıştır.

Çelik sac malzemeler, ingot döküm veya sürekli döküm tesislerinden elde edilen dikdörtgen kesite sahip, slab adı verilen ara mamul çeliğin haddelenmesi ile üretilir. Üretim, demir cevherinden çelik saca kadar çok aşamalı olan, birbirlerinden farklı üretim yapan tesislerin yardımıyla gerçekleştirmektedir. Bunun için oldukça büyük bir alana sahip fabrikaya ihtiyaç duyulmaktadır. Çelik sac üretimi için gerekli olan aşamalar Şekil 2.1'de verilmiştir (Değirmenci, 2006).



Şekil 2.1. Çelik sac üretimde kullanılan bir tesisin genel olarak üretim akışı (Değirmenci, 2006).



Çelik saclar üretim yöntemlerine göre sıcak haddelenmiş çelik sac malzemeler ve soğuk haddelenmiş çelik sac malzemeler olmak üzere iki bölüme ayrılmaktadır. Sıcak haddelenmiş sac malzemeler yapı çeliklerinde, basınçlı kazan çeliklerinde, LPG tüp çeliklerinde, gemi yapım çeliklerinde ve boru çeliklerinde kullanılmaktadır. Otomotivde daha çok tercih edilen soğuk haddelenmiş sac malzemeler şekillendirmeye ve sıvama işlemine uygun çelik sac malzemelerdir. Minimum akma ve çekme dayanımı ve asgari uzama değerleriyle garanti edilirler. Düşük oranda karbon ihtiva ederler ve çok iyi kaynak kabiliyetleri vardır (Değirmenci, 2006).

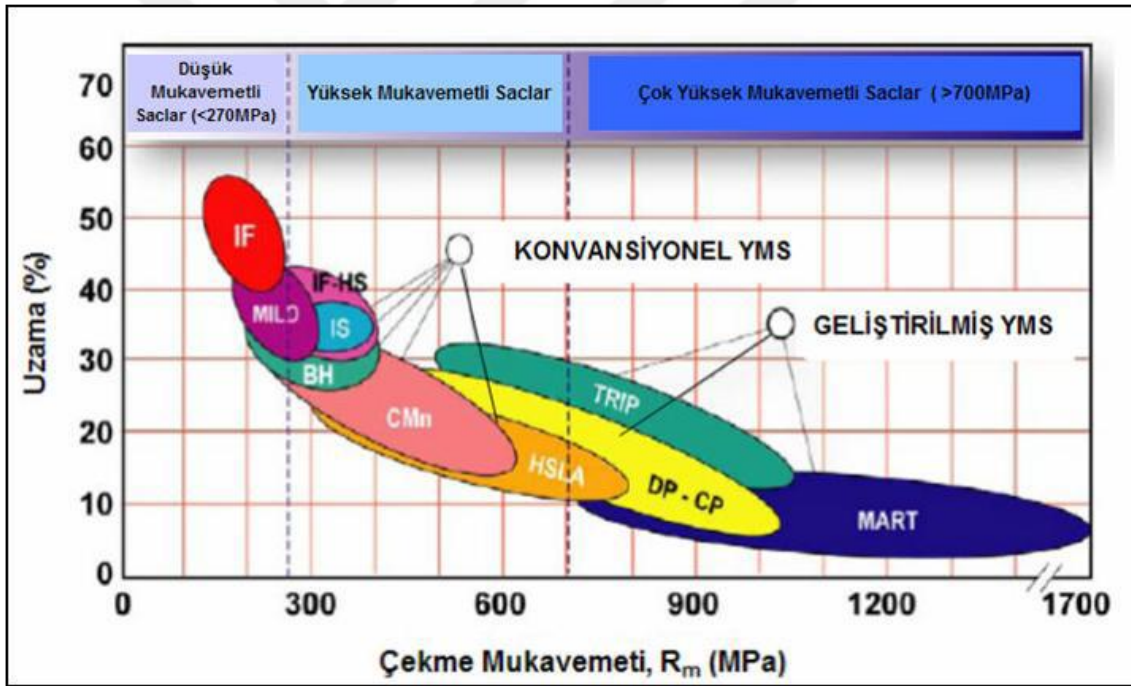
Çelik sac malzemelerin sınıflandırılmasında yaygın olarak kullanılan yöntem metalürjik özelliklerine göre yapılan sınıflandırma sistemidir. Bu tip sac malzemelerin sınıflandırılmasında kullanılan ifadeler Çizelge 2.1'te verilmiştir.

**Çizelge 2.1.** Metalürjik özelliklerine bağlı olarak çelik sac malzemelerin sınıflandırılması (Uslu, 2014).

<b>Düşük Mukavemetli Saclar (DMS)</b> Low Strength Steels (LSS)	<b>Arayer Atomsuz Saclar</b> Interstitial - Free Steels (IF)
	<b>Yumuşak Saclar</b> Mild Steels (MILD)
<b>Yüksek Mukavemetli Saclar (YMS)</b> High Strength Steels (HSS)	<b>Fırında Sertleşebilen Saclar</b> Bake Hardenable Steels (BH)
	<b>İzotropik Çelikler</b> Isotropic Steels (IS)
	<b>Yüksek Mukavemetli Arayer Atomsuz Saclar</b> High Strength Interstitial - Free Steels (IF-HS)
	<b>Karbon Manganezli Saclar</b> Carbon Manganese Steels (CMn)
<b>Geliştirilmiş Yüksek Mukavemetli Çelikler – (GYMÇ)</b> Advanced High Strength Steels (AHSS)	<b>Yüksek Mukavemetli Düşük Alaşımli Saclar</b> High Strength Low Alloy Steels (HSLA)
	<b>Dönüşümle Oluşturulan Plastisite Saclar</b> Transformation Induced Plasticity Steels (TRIP)
	<b>Çift Fazlı Saclar</b> Dual Phase Steels (DP)
	<b>Kompleks Fazlı Saclar</b> Complex Phase Steels (CP)
	<b>Martenzitik Saclar</b> Martenzitic Steels (MART)

Tüm sektörlerde olduğu gibi otomotiv sektöründe de istenen ideal malzeme; mukavemeti yüksek, hafif, kolay şekil alabilen, yüksek korozyon dirençli ve ucuza mal edilebilen malzemelerdir. Yakıt tasarrufu ve çevreyi korumada yüksek mukavemet ve hafiflik istenir. Aynı zamanda şekillendirilebilme özelliği de imalat yöntemlerinde fayda sağlar.

Yukarıdaki çizelgede sözü edilen çelik sac malzemelerin uzama-çekme mukavemet değerlerine göre gruplandırılması Şekil 2.2'de verilmiştir. Çekme mukavemet değerinin artmasıyla uzama miktarlarının düştüğü görülmektedir. Uzama değerlerinin en fazla olduğu saclar düşük mukavemetli saclardır. Yüksek mukavemetli çelik sacların (HSLA) maksimum 800 MPa çekme mukavemet değerlerinde kullanılmaları dikkat çekicidir. Aynı çekme mukavemet değerine sahip HSLA, DP ve TRIP saclara bakıldığında DP ve TRIP çelik sacların uzama değerlerinin daha yüksek olduğu görülmektedir (Yenice, 2006).



Şekil 2.2. Yüksek mukavemetli çelikler (AHSS Application Guidelines, 2017).

## 2.2. Talaşlı İmalat

Talaşlı imalat; iş parçası üzerinden, sertliği daha yüksek bir kesici takım yardımıyla, küçük parçacıklar halinde malzeme (talaş) koparılarak yapılan şekillendirme işlemleridir.

Talaşlı imalatta uygulanan üç temel hareket şunlardır:

- 1) Kesme hareketi

2) İlerleme hareketi

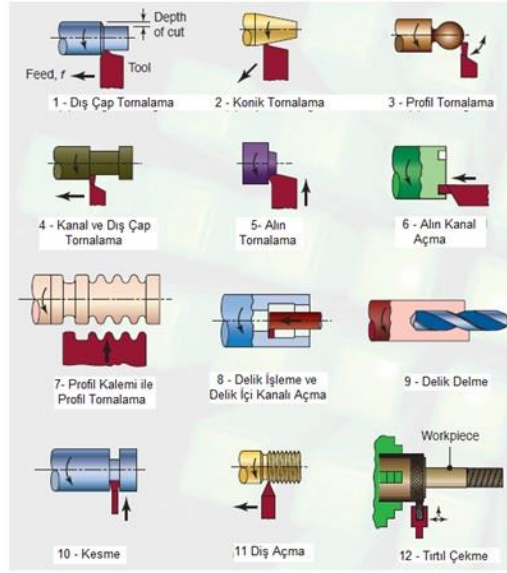
3) Talaş derinliği (Kaptı, 2015).

Başlıca talaşlı imalat yöntemleri aşağıdaki gibidir;

- Tornalama
- Frezeleme
- Planyalama & Vargelleme
- Taşlama
- Broşlama

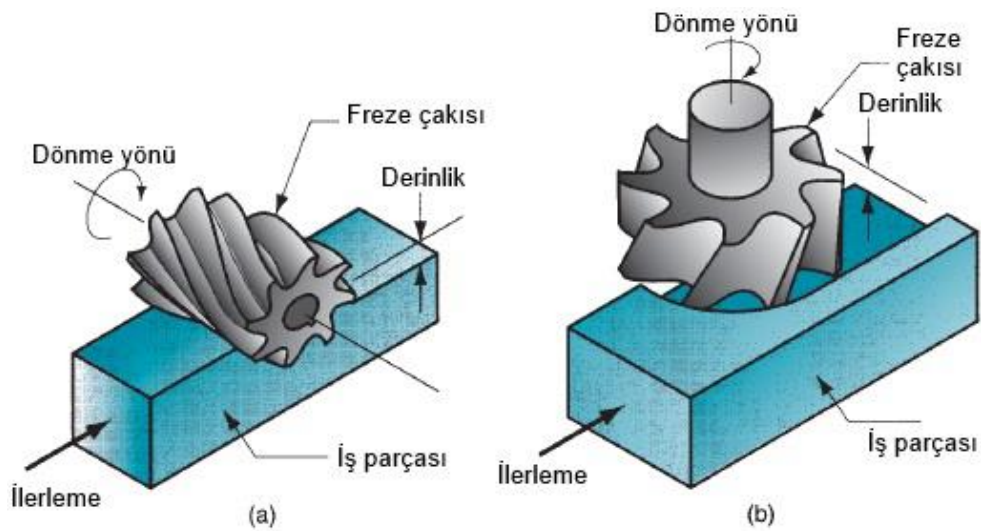
Talaşlı imalat yardımıyla malzemeler üzerinden parçacıklar kaldırarak istenen şekil ve ölçülerde parça imali; parçalar üzerinde delik, vida, diş ve kanalların açılması mümkün olmaktadır. Talaşlı imalatta iş parçası üzerinden talaş kaldırmaya yarayan gereçlere takım adı verilir. Kullanılan takımlar malzemelerine göre dört gruba ayrılmaktadır. Takım çelikleri, sert metaller, seramik takımlar ve elmaslardır. Talaşlı imalat sırasında gerekli olan güç ve hareketi sağlayan araca ise takım tezgâhı adı verilir. Talaşlı imalat tezgâhları takım ve iş parçasının hareket tarzına göre farklı isimler alır (Ünal, 2009).

Kendi eksenini etrafında dönen iş parçası üzerinden, uygun açıda bilenmiş kesiciler yardımıyla talaş kaldırma işlemine tornalama denir (Şekil 2.3). İşlem sırasında kesme hızı ve parçanın devir sayısı işlemin toplam hızını ifade eder. Bununla birlikte kesme hızı ve parça devir sayısının seçimi elde edilecek ürünün yüzey kalitesini belirlemede önem teşkil etmektedir. İşlem parametreleri işlenecek parçanın malzemesine ve bir seferde parçadan kaldırılacak talaş miktarına bağlıdır (Çelik, 2010).



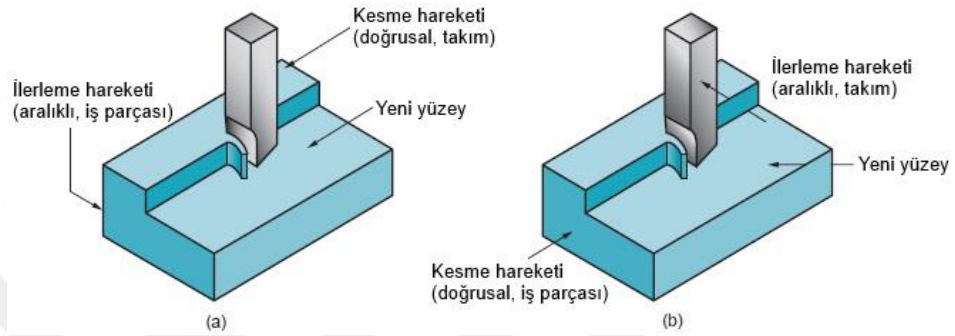
Şekil 2.3. Başlıca tornalama işlemleri (<http://www.hamitarslan.com>).

Frezeleme; kendi eksenini etrafında dönen takımın kesme hareketi ve parçanın ilerleme hareketi ile parçadan talaş kaldırmasıdır (Şekil 2.4). Freze işleminde genel olarak silindirik olmayan düz parçalar işlenmektedir. Frezelemede işlem hızı, iş parçasının ilerleme hızı, kesici takımın diş derinliği ve kesici takıma verilen işleme derinliğine bağlıdır. Bu sebeple, işlenecek parçanın yüzey özellikleri veya kaldırılacak olan talaşın şekli (kaba veya ince) bu parametreler dikkate alınarak ayarlanmalıdır (Çelik, 2010).



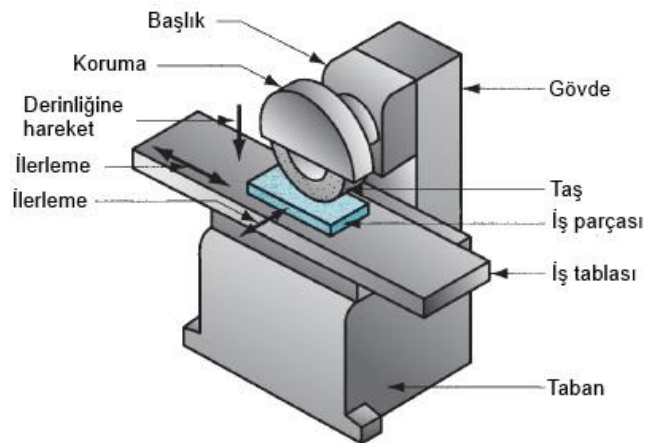
Şekil 2.4. (a) Çevresel ve (b) Alın Frezeleme işlemleri (Çelik, 2010).

Tek ağızlı bir takımın doğrusal kesme hareketi ile yatay, dikey veya açılı talaş kaldırma işlemlerine planyalama ve vargelleme denir (Şekil 2.5). İki yöntem birbirine oldukça benzerdir. Aralarındaki fark; planyalamada ilerleme hareketi parça ve kesme hareketi takım ile yapılırken, vargellemede kesme hareketinin parça ve ilerleme hareketinin takım tarafından yapılmasıdır (Çelik, 2010).



Şekil 2.5. (a) Vargelleme ve (b) Planyalama İşlemleri (Çelik, 2010).

Taşlama, aşındırıcı bir takım yardımıyla yapılan talaş kaldırma işlemidir. Yöntemde kesme, taş adı verilen takımın dönme veya ilerleme hareketi ile gerçekleşir. İlerleme hareketi, taşlama tezgâhının türüne göre ya takım tarafından ya da iş parçası tarafından gerçekleştirilir (Şekil 2.6). Taşlama işlemi genellikle diğer talaşlı üretim yöntemleri ile işlenen parçaların yüzey kalitesini artırmak için uygulanır (Çelik, 2010).



Şekil 2.6. Taşlama tezgahı (Çelik, 2010).

Boşaltma işlemi olarak da bilinen broşlama, doğrusal hareket yapan çubuk şeklinde bir kesici takımla talaş kaldırma işlemidir. Silindirik veya tığ şekilli broş deneni takımlar çekilerek veya basılarak işlem yapılır (Çelik, 2010).

### 2.3. Plastik Şekil Verme Yöntemleri

Katı fazdaki metallerin biçiminin dış kuvvetler etkisi ile cismi oluşturan malzemede herhangi bir kütleli ya da bileşimsel farklılaşma olmadan kalıcı olarak değiştirmesine plastik şekil değişimi adı verilmektedir (Çapan, 2003). Plastik şekil verme yüksek sıcaklıkta yapıldığında malzemenin iç yapısındaki boşluk ve gözenekler kapanır. Yeniden kristalleşen kaba döküm yapısı ise yerini ince taneli homojen bir iç yapıya bırakır. Bu sayede mekanik özelliklerde (akma dayanımı, çekme dayanımı, yorulma dayanımı, darbe dayanımı, kırılma tokluğu, süneklik vb.) önemli iyileşmeler olur. Plastik şekil verme soğuk olarak yapıldığında ise oluşan pekleşme sayesinde malzemenin dayanımı artar. Soğuk şekillendirme ile dar toleranslı hassas parçalar istenilen yüzey kalitesinde üretilebilir (Aran ve Demirkol, 1995).

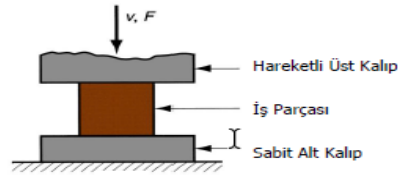
Doğrudan basma yöntemiyle şekillendirme için gerekli basma gerilmesi parça yüzeyine doğrudan uygulanmaktadır. Sac metalin akış yönü basma gerilmesinin yönüne dik olarak konumlanır. Bu tür şekillendirme yöntemlerine örnek olarak dövme ve haddeleme işlemleri gösterilebilir. Dolaylı basma yöntemi ise basma gerilmesine ek dış kuvvetler yardımıyla oluşan şekillendirme yöntemidir. Bunlara örnek olarak ekstrüzyon ve tel çekme verilebilir (Aran ve Demirkol, 1995).

#### 2.3.1. Dövme

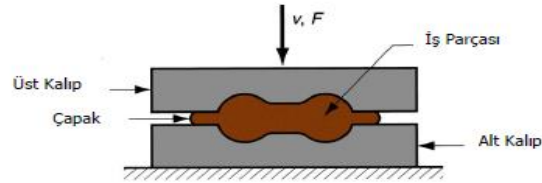
Eski bir üretim yöntemi olan dövme, iş parçasının basma kuvvetlerinin etkisiyle plastik şekil değiştirdiği bir işlemdir. Krank milleri, el aletleri, civata kafaları, dişliler, biyel kolları, kancalar gibi birçok makine parçası bu yöntemle üretilmektedir. Dövme işlemleri sıcak ve soğuk olarak yapılmaktadır. Soğuk dövme işlemi sırasında şekil değişimi sebebiyle peklesen malzeme dövme kuvvetinin giderek artmasına neden olur. Bu yüzden soğuk dövme küçük parçaların şekil değişimleri için uygundur. Günümüzde daha çok kullanılan ise sıcak dövme yöntemidir. Sıcak dövme işleminde hem malzemenin kolay şekillendirilebilmesi hem de dövme kuvvetlerinin düşük olması nedeniyle daha çok tercih edilmektedir. Dövme yönteminde kullanılan malzemeler; basit karbonlu çelikler, düşük alaşımlı çelikler, alüminyum alaşımları, bakır ve titanyum alaşımları olarak gösterilebilir (Aran ve Demirkol, 1995).

Dövme yöntemleri açık kalıpta dövme, kapalı kalıpta çapaklı dövme ve kapalı kalıpta çapaksız dövme olarak üçe ayrılabilir. Açık kalıpta dövme, Şekil 2.7'de gösterildiği gibi iki düz

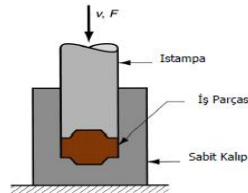
kalıp arasında parçaya basma gerilmesi uygulanarak yapılan şekillendirmedir. Yığıma ismi de verilir. Kapalı kalıpta çapaklı dövme işlemi, malzemeyi basma gerilmeleriyle sıkıştırarak kalıp boşluklarına doldurulması olarak tanımlanmaktadır (Şekil 2.8). Kapalı kalıpta çapaklı dövmede çapak tasarımı önemlidir. Dövme sırasında malzemenin kalıbın tüm boşluklarını doldurması ve fazlasının çapak boşluğundan dışarı atılması amaçlanır. Çapak boşluğu dar tutulursa çapağın dışarı akması zorlaşır ve kalıba büyük bir basınç yapar. Bu durum kalıbın erken aşınmasına hatta kırılmasına yol açabilir. Kapalı kalıpta çapaksız dövme işlemi hassas dövme olarak da adlandırılır (Şekil 2.9). Basit ve simetrik parçaların imalatı için uygundur. Kalıbın kapalı durumu dövülecek parça hacmine çok yakın olmalıdır, çapak gibi fazla malzemenin akacak yeri olmadığından işlem çok hassas yapılmalıdır (Demirkol, 2010).



Şekil 2.7. Açık kalıpta dövme işlemi (Demirkol, 2010).



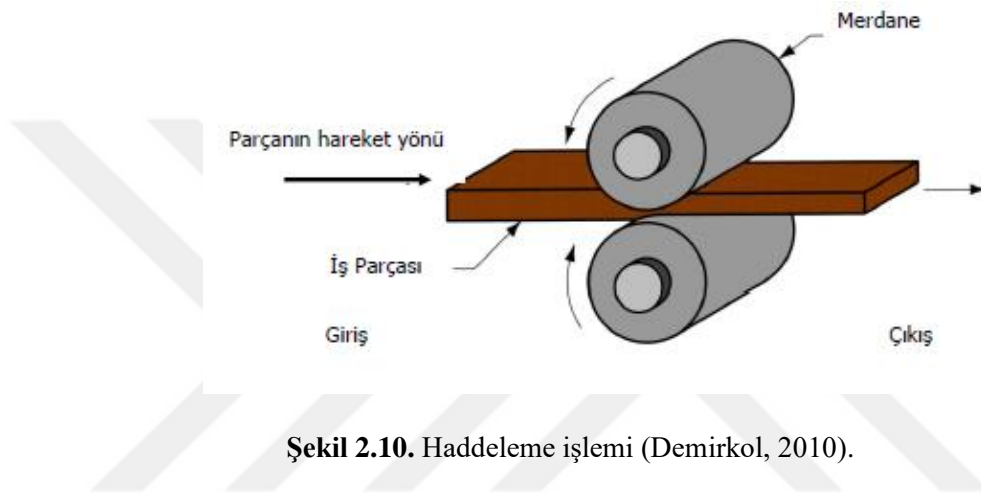
Şekil 2.8. Kapalı kalıpta çapaklı dövme işlemi (Demirkol, 2010).



Şekil 2.9. Kapalı kalıpta çapaksız dövme işlemi (Demirkol, 2010).

### 2.3.2. Haddeleme

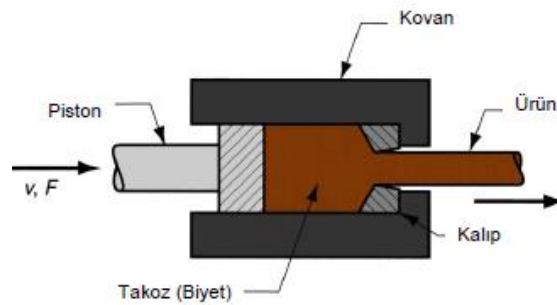
Haddeleme Şekil 2.10’da görüldüğü gibi birbirine karşı döndürülen iki merdane arasında parçayı ezerek şekillendirme işlemidir. Haddeleme yassı ve profil haddeleme işlemi olarak ikiye ayrılmaktadır. İşlem sıcaklığı olarak büyük şekil değişimlerinin verilebildiği sıcak haddeleme ve daha sınırlı sacların yassı haddeleme yöntemiyle üretildiği soğuk haddeleme işlemi vardır (Demirkol, 2010).



Şekil 2.10. Haddeleme işlemi (Demirkol, 2010).

### 2.3.3. Ekstrüzyon

Basma gerilmeleri ile malzemenin sıkıştırılması ve bir kalıptan o kalıbın şeklini alarak akmaya zorlanması ile gerçekleştirilen şekillendirme işlemine ekstrüzyon denir (Şekil 2.11). Belirli bir kesite sahip malzemenin uzun boylarda üretilmesini sağlar. Uniform kesite sahip uzun yarı mamullerin üretimi için uygundur (Demirkol, 2010).

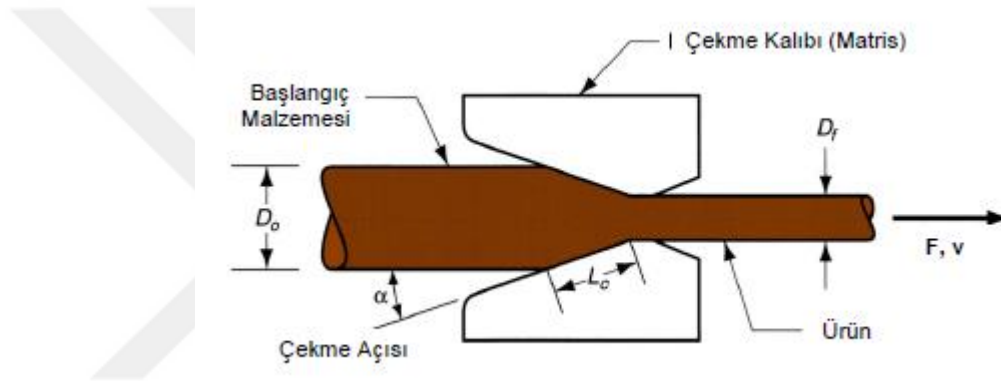


Şekil 2.11. Ekstrüzyon işlemi (Demirkol, 2010).



### 2.3.4. Çekme

Çekme yönteminde malzemeler bir kalıp içinden geçirilerek kesitleri daraltılır ve biçimlendirilir. Bu işlem için parçaya çıkış tarafından bir çekme kuvveti uygulanır (Şekil 2.12). Yöntem yüksek bir yüzey kalitesi ve boyut hassasiyeti isteyen parçalar için uygundur. Elde edilen ürünün kesit biçimi ve büyüklüğüne bağlı olarak bu yöntem çubuk, tel ve boru çekme olarak sınıflandırılabilir. Sıcak ve soğuk çekme uygulanabilir. Genellikle soğuk çekme tercih edilir. Soğuk çekmede de parçanın deformasyonu ve sürtünmesinden kaynaklı ısı oluşumu söz konusudur (Alan ve Demirkol, 1995).



Şekil 2.12. Çekme işlemi (Demirkol, 2010).

### 2.3.5. Sac işleme yöntemleri

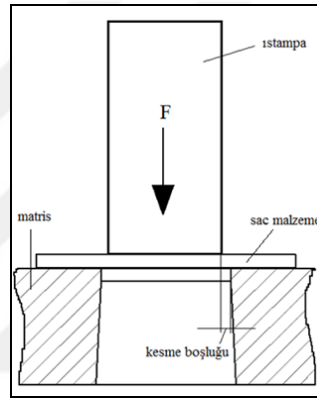
Çelik saclar istenilen final parçalara ulaşabilmek için günümüzde hidrolik veya mekanik presler kullanılarak çeşitli yöntemler ile şekillendirilirler. Sıvama, bükme, kesme veya diğer özel yöntemlerle sac şekillendirme işlemleri yapılır. Sac şekillendirme esnasında sacda çatlama, yırtılma, incelme, geri esneme vb. hataların olmaması istenmektedir. Bu nedenle sac malzemenin şekillendirme sırasında gerinim dağılımının tekbiçim olması ve bu gerinimlerin her malzemede belirtilen aralıklardaki tolerans değerlerinin içinde olması gerekmektedir (Değirmenci, 2006).

Sac şekillendirme işlemlerinde kullanılan kalıplar genelde iki parçadan oluşurlar; bunlardan birisine erkek adı verilirken karşılığına dişi denir. Şeklin çıkıntılı kısmına sahip olana erkek kalıp (zımba veya ıstampa), girintili şekle sahip tarafa dişi kalıp (matris veya kalıp) olarak adlandırılmaktadır. Bazı durumlarda sacı sabit tutmak veya kırışmasını önlemek amacıyla baskı

çemberi veya pot çemberi kullanılması gerekir. Pot veya baskının sacı sabit tutması için pnömomatik sistemler gereklidir. Alt ve üst kalıbın birbirine olan konumu da parça hassasiyeti için oldukça önemlidir. Bu sebeple kalıplarda aksel bir kaçıklık olmaması gerekmektedir.

### Kesme

Sac malzeme temininden sonra yapılan ilk şekillendirme işlemi kesme işlemidir (Şekil 2.13). Saclar genellikle rulo veya plakalar halinde gelirler ve istenilen ölçülere getirilmesi için kesme işleminden geçmeleri gereklidir. Bu kesme işlemi için basit bir kesme kalıbı kullanılabilir veya lazer kesim yapılabilir.



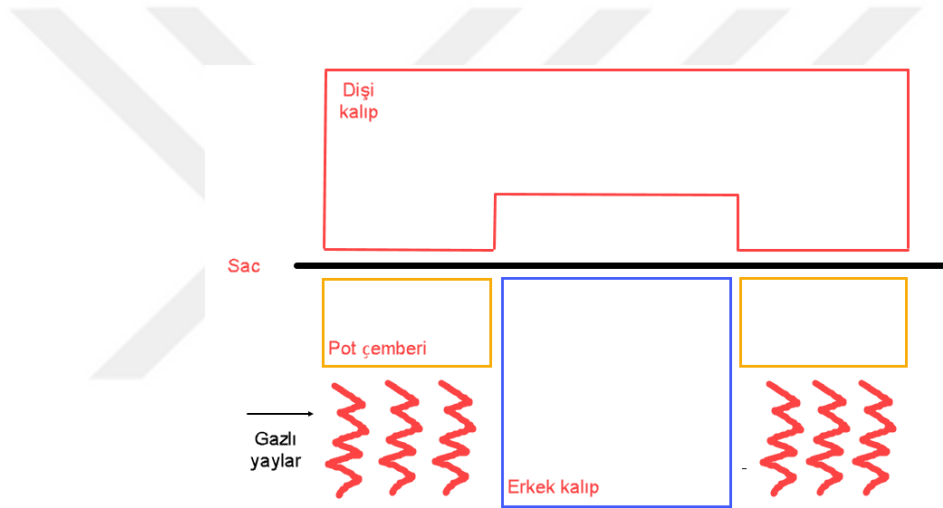
**Şekil 2.13.** Kesme işleminin şematik çizimi (Uslu, 2014).

Sac metal kesmedeki işlem parametreleri zımba ile kalıp arasındaki boşluk, sac kalınlığı, malzeme cinsi, mukavemeti ve kesme uzunluğudur. Kesme işlemindeki boşluk zımba ile kalıp arasındaki mesafe olup malzeme özelliğine ve sac kalınlığına bağlı olarak belirlenir. Kesme işleminde bırakılan boşluk sacın %1'i kadardır. Boşluk belirli değerden küçük olduğunda gerekli kesme kuvveti artarken, boşluğun fazla olması çapağı büyütür ve ürün kalitesini olumsuz etkiler (Erdin, 2003).

### Sıvama

Sac metal şekillendirme işlemlerinin bir diğeri olan sıvama yönteminin kullanım alanları oldukça geniştir. Otomotiv endüstrisinde kullanılan parçalardan, tencerelere derin formlu olan çoğu parça bu yöntem kullanılarak üretilmektedir. DIN 8584 standardına göre sıvamanın tanımı şöyledir: Sıvama, düz bir sacın, sac kalınlığında kasti bir değişim beklenmeden, bir tarafı açık oyuk bir yapıya, çekme-basma gerilme esaslı şekillendirilmesi işlemidir (Değirmenci, 2006).

Sıvama yönteminde Şekil 2.14’ de gösterildiği gibi bir dişi kalıp, bir erkek kalıp ve bir pot çemberi bulunmaktadır. Düz sac pot çemberi üzerine konulduktan sonra kalıp kapanırken pot çemberinin altında bulunan gazlı yaylar pres kuvvetine yenilerek aşağıya doğru harekete başlar. Bu esnada erkek kalıp üzerine sıvanan sac istenilen şekli almaya başlar. Pot, sacı sabit tutmak ve erkek kalıp üzerine sıvanan sacın kırışmasını engellemek için kullanılır. Bazı durumlarda gerek parçanın şeklinden kaynaklı gerekse kullanılan malzemeye bağlı olarak sac kırışmaya eğilimlidir. Bu gibi durumlarda pot çemberi üzerine süzme kanalları açılır. Süzme kanalları sacı kilitleyerek gerilmeye sebep verir. Sıvama işleminde kırışma veya fazla gerdirmekten yırtılma problemleri ile karşılaşmaktadır. Bunların önüne geçmek için ince ayarlar yapılması gerekmektedir.



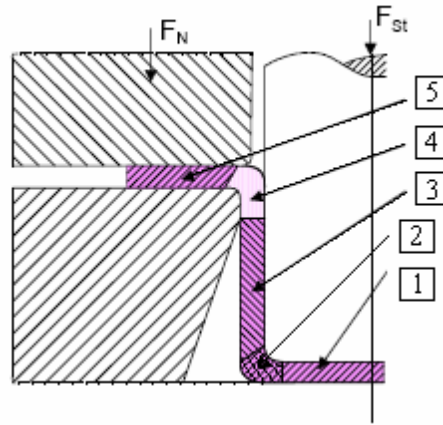
**Şekil 2.14.** Sıvama işleminin gösterimi.

Sıvama işlemini etkileyen önemli parametreler; sac malzemenin özellikleri, erkek ve dişi kalıp arasındaki boşluk, kalıp köşe yuvarlatması yarıçapı, pot çemberi basıncı, sürtünme katsayısı ve yağlamadır (Lange, 1985).

İki aşamada gerçekleşen sıvama işleminin birinci aşama olan ilk temas anında erkeğin saca değmesiyle birlikte sac bir miktar şişer, erkek saca baskı uygulayarak şeklini saca iletir ve derinliği az olan bir şişme bölgesi oluşur (Şekil 2.15). İlk aşamada erkek ve dişinin temasından oluşan gerilmeler ve buna bağlı incelmeler başlayacaktır. 1 no’lu bölgede sac sabittir, herhangi bir gerilme görülmez. Devamındaki 2 no’lu bölgede ise, malzeme bükülmeye zorlanır ve bu bölgede gerilme ile incelmeler başlar. 3 no’lu bölge parçanın duvarının oluşturacak olan bölgedir. Erkek ilerledikçe duvarda da gerilmeler başlayacaktır ve incelme etkisi oluşacaktır.

Flanş kısmı olan 5.bölge ise erkek formlama aşamasındayken neredeyse hiç hareket etmeyerek kalıp içerisine akış göstermemiştir (Zhu, 1999; Wagoner ve Chenot, 2001).

Erkeğin formlamaya devam etmesiyle birlikte parça duvarı büyümekte ve derinleşmekte, sıvamanın ikinci aşaması başlamaktadır. Bu aşamada sacın temas ettiği her bölgede, sürtünme kuvvetleri etkisini göstermeye başlayacaktır. Sürtünme kuvvetinin etkisiyle çekme gerilmeleri artacaktır. Buna bağlı olarak incelmeler artacağından yırtılma riskleri oluşacaktır. Yırtılma riski boyunlanmanın da fazlaca olduğu 2 ve 3 no'lu bölgeler arasında oluşacaktır. Bükülen parça pekleşir ve süneklığı azalır. İncelme ve yırtılmaya sebep olan bu durum süneklığın azalmasıdır. 4 no'lu bölgede pekleşen malzeme yarıçapından akarken yüksek kuvvet gerekmektedir. Dişi kalıp ve pot çemberi arasındaki flanş radyal yönde kalıp içerisine doğru akarken, çevresel yönde kuvvete maruz kalmaktadır (Zhu, 1999; Wagoner ve Chenot, 2001).

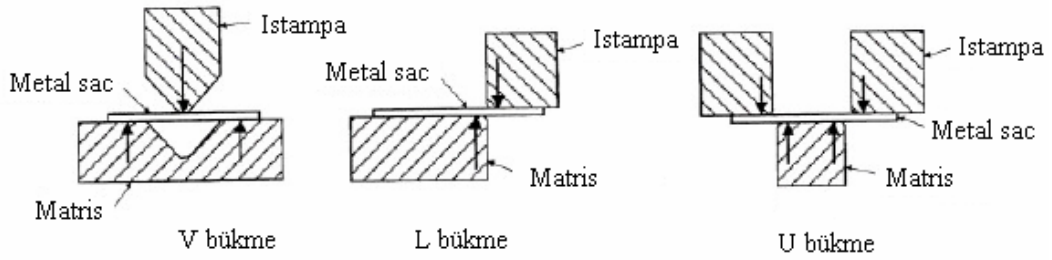


**Şekil 2.15.** Sıvamada oluşan farklı gerilme bölgeleri (Değirmenci, 2006).

### Bükme

Sac şekillendirme yöntemlerinden en çok kullanılan yöntemlerden biri bükme ile şekillendirmedir. Bükme işlemi, sac malzemedan talaş kaldırmadan belirli bir eksen etrafında döndürülerek şekillendirmedir. Parça plastik deformasyona uğrayarak kalıcı şekil değiştirir. Çeşitli bükme yöntemleri vardır, bunlar; V bükme, U bükme, kenar bükme (L bükme), serbest bükme, çift etkili bükme olarak sıralanmaktadır.

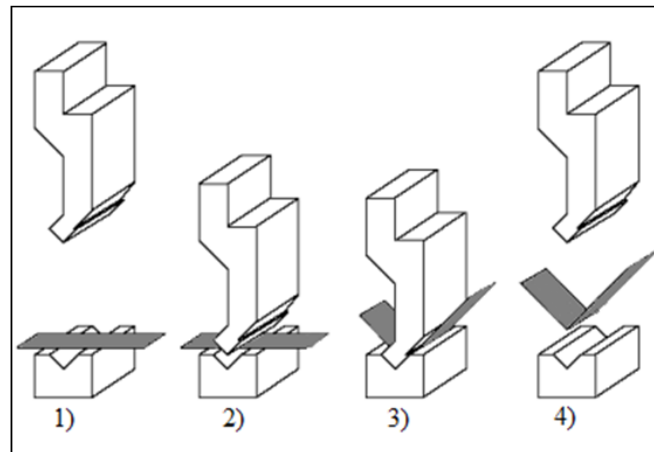
Şekil 2.16'da gösterilen en yaygın bükme işlemlerinde, bükme tek eksende olabildiği gibi karmaşık şekillendirme durumlarında farklı profile sahip eksenlerde de olabilmektedir (Mielnik, 1991).



**Şekil 2.16.** En yaygın bükme işlemleri (Mielnik, 1991).

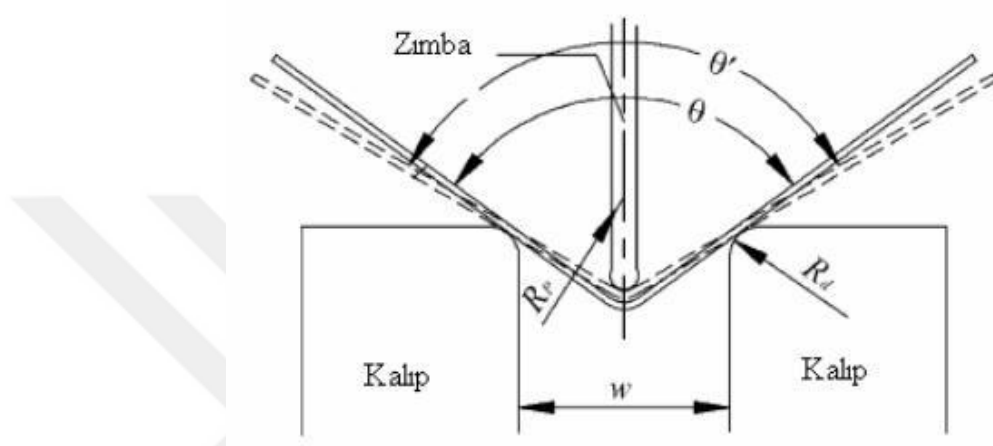
Bükülmüş bir parçada meydana gelen değişiklikler; sacın malzeme kalitesi ve kalınlığına, bükme açısına, bükme yarıçapı ve bükme kuvvetine bağlıdır. Bükme ile şekillendirmede uygulanan kuvvet malzemenin esnekliğini yenerek kalıcı şekil değiştirmesini sağlayacak miktarda olmalıdır (Arslan, 2007).

V bükme işlemi sırasında saca ilk temas eden zımbanın etkisiyle sac, zımba ucunun vurduğu noktadan bükülmeye başlar. Sacı temas etmeyen noktalar yukarı doğru esneme yapar. Malzeme kalıp yarıçapından kayma hareketi sayesinde zımbanın şeklini almaya başlar. Bükme devam ettikten sonra yan yüzeylerde zımbaya temas eder ve istenilen büküm gerçekleşmiş olur. Sac malzeme tamamen kalıbın içini doldurmuş durumdadır (Arslan, 2007). Şekil 2.17 'de V bükme işleminin safhaları görülmektedir.



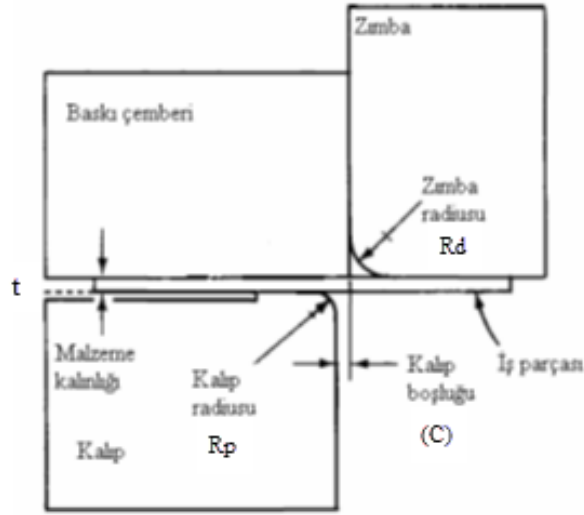
**Şekil 2.17.** V bükme işleminin safhaları (Kılıç, 2009).

Serbest bükme, V bükmeye şekilsel olarak benzese de ondan farklı olarak finalde dişi ve erkek kalıpta tam kapanma gerçekleştirmez. Parçanın duvarları bükmenin başında ve sonunda serbest haldedir. Serbest bükmede zımbanın aşağı inmesiyle gereken bükme açısı oluşur. Şekil 2.18’de görüldüğü gibi  $R_p$  zımba yarıçapı,  $R_d$  kalıp yarıçapı,  $\theta$  bükme açısı ve  $\theta'$  ise büküm öncesi zımba açısıdır.  $\Delta\theta$  ise geri esneme açısıdır (Arslan, 2007).



**Şekil 2.18.** Serbest bükme işlemi (Arslan, 2007).

Bir başka bükme yöntemi olan L bükme (kenar bükme) metodunda sac malzeme üstten bir baskı çeliğiyle sabit tutulur. Şekillendirici zımbanın aşağı doğru hareketiyle sac kenarı şekillenir. Bükülecek kenar, sacın tamamına göre daha kısa ise bu yöntem tercih edilir. Şekil 2.19’da görüldüğü gibi  $R_p$  zımba yarıçapı,  $R_d$  kalıp yarıçapı,  $C$  zımba ve kalıp arasındaki boşluk,  $t$  ise sacın kalınlığıdır (Ling vd., 2005).



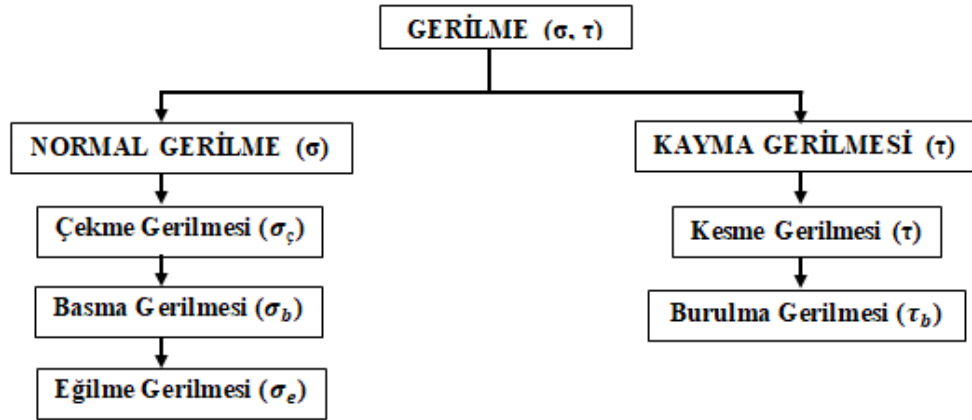
Şekil 2.19. Kenar bükme işlemi (Ling vd., 2005).

## 2.4. Malzemelerin Mekanik Özellikleri

Dış kuvvetlerin etkisi altında değişik zorlamalar karşısında, malzemede oluşan şekil değişiklikleri ve bu etkiler altında malzemenin gösterdiği dayanma gücü özelliklerine mekanik özellikler adı verilir. Yapının etkilendiği dış kuvvetlere uzun süreli olarak karşı koyarak, fonksiyonunu yerine getirebilmesi büyük ölçüde malzemenin mekanik özelliklerine bağlıdır. Malzemenin mekanik özelliklerini anlayabilmek için gerilme ve şekil değiştirme kavramlarını tam anlamıyla kavramak gerekmektedir (Gök vd., 2018).

### 2.4.1. Gerilme çeşitleri ve bileşik gerilme

Gerilmeler temel olarak normal ve kayma gerilmeleri olmak üzere iki türde incelenebilir (Şekil 2.20). Hesaplamanın yapılacağı kesite dik doğrultudaki normal gerilme, çekme ya da basma ( $\pm F$ ) biçimindeki normal kuvvet veya eğilme momenti ( $M_e$ ) sonucunda meydana gelir. Hesaplamanın yapılacağı kesite teğet doğrultudaki kayma gerilmesi ise kesme kuvveti ( $T$ ) veya burulma momenti ( $M_b$ ) sonucunda meydana gelir (Gök vd., 2018).



Şekil 2.20. Gerilme çeşitleri (Gök vd., 2018).

Hesaplamanın yapılacağı kesit üzerine birden fazla kuvvet uygulanıyorsa bileşke kuvvetin bulunması gerekmektedir. Kesit üzerinde uygulanan kuvvetler sonucu oluşan gerilmeler aynı cinsten gerilmeler ise cebirsel olarak toplanabilir aksi takdirde cebirsel olarak toplanamaz. Örneğin; kesitteki gerilmeler çekme, basma ve eğilme gerilmelerinden oluşuyorsa bu gerilmeleri cebirsel olarak toplanabilir. Elde edilen bileşke gerilme malzemenin akma dayanımı ( $\sigma_{ak}$ ) ile karşılaştırılır ve yük altındaki kesitin hasara uğrayıp uğramayacağı belirlenir.

Fakat kesitte hem normal gerilme hem de kesme ya da burulma gerilmesinin sebep olduğu kayma gerilmesi söz konusu ise cebirsel olarak toplanamaz. Böyle durumlara kesitteki maksimum normal gerilme ( $\sigma_{max}$ ) ve maksimum kayma gerilmesi ( $\tau_{max}$ ) hesaplanır. Bu değerler mukavemet hipotezleri ile karşılaştırılarak yük altındaki kesitin hasara uğrayıp uğramayacağı belirlenir (Gök vd., 2018).

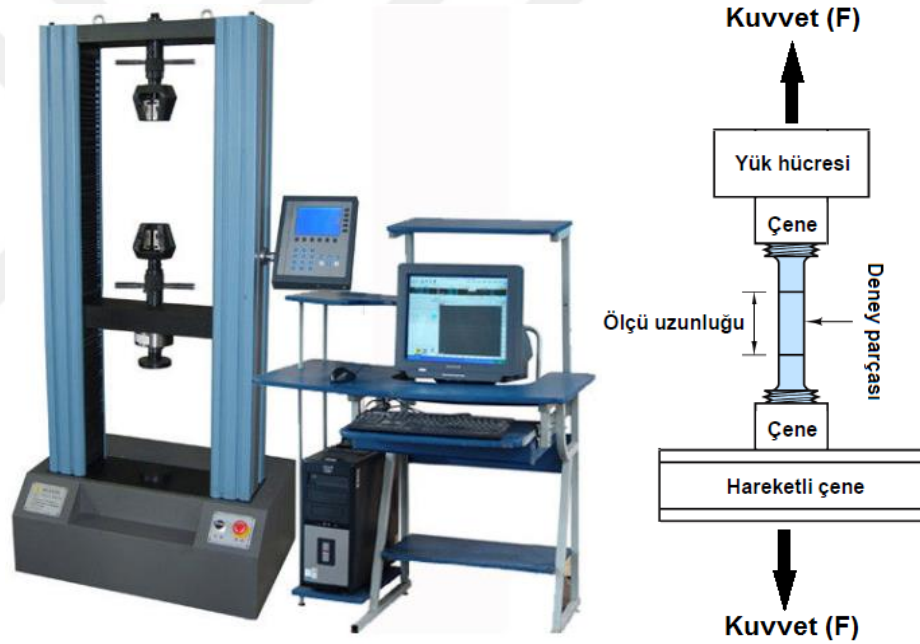
#### 2.4.2. Çekme deneyi

Çekme deneyi, malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi ve mekanik davranışlarına göre sınıflandırılması amacıyla yapılmaktadır. Çekme deneyi sonucunda elde edilen veriler mühendislik hesaplarında doğrudan kullanılır. Bundan dolayı çekme deneyi en yaygın olarak kullanılan tahribatlı malzeme muayenesi yöntemlerinden biridir (Savaşkan, 2015).

Günümüzde çok gelişmiş, üniversal çekme-basma deneyi cihazları mevcuttur. Bu cihazlar hidrolik ve elektronik sistemlerle donatılmış ve değişik yükleme kapasitelerine sahiptir. Ayrıca, uygulanan yük ve meydana gelen uzama değerleri bilgisayarlar yardımıyla anında



çizdirilebilmektedir. Bu cihazlarda numune boyunda meydana gelen uzama, temas tipi uzama ölçerlerin (ekstansometer) yanında son yıllarda geliştirilen temassız video uzama ölçerler (video ekstansometer) ile belirlenmektedir. Üniversal bir çekme cihazı Şekil 2.21’de de gösterildiği gibi temelde iki kısımdan oluşmaktadır. Bunlar, deneyin gerçekleştirildiği elektromekanik sistem, diğeri ise alınan verilerin işlendiği ve sonuçların elde edildiği veri işleme sistemidir. Elektromekanik sistem ise, numunelerin yerleştirildiği çeneler, uygulanan yükün algılandığı yük hücresi, meydana gelen uzamanın ölçüldüğü uzama ölçer (ekstansometer) ve hareketin sağlandığı mekanik sistemlerden oluşmaktadır. Veri işleme sistemi ise modern makinelerde bilgisayar vasıtasıyla gerçekleştirilmektedir. Bu sistemde gelişmiş yazılımlar sayesinde, çekme deneyi ile elde edilebilecek bütün veriler toplanıp işlenebilmektedir (Pürçek, 2014).

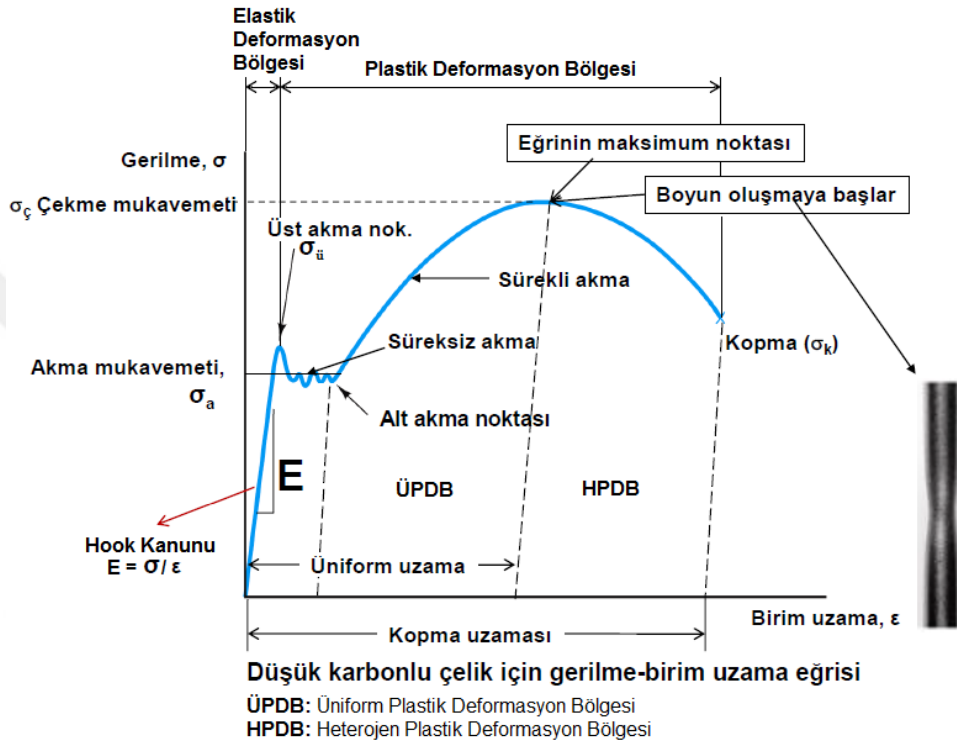


**Şekil 2.21.** 20KN bilgisayar servo kontrol laboratuvar test cihazları universal çekme test cihazı (<http://www.turkish.climate-chambers.com>).

### 2.4.3. Gerilme – şekil değiştirme eğrisi

Çekme cihazında standartlara göre hazırlanmış çekme numunesine kuvvet uygulandığında çekme cihazı numunede meydana gelen kuvvet-uzama değerlerini veri işlem sisteminde ilk kesite bölerek gerilme ve boyca uzamaya değerini ilk uzunluk değerine bölerek de birim şekil değişimini hesaplayarak Gerilme – Birim Şekil Değişimi (Birim Uzama) ( $\sigma$ - $\epsilon$ )

grafiği elde edilir.  $\sigma$ - $\epsilon$  grafiği mühendislik malzemelerin mekanik özellikleri ile ilgili fikir verir. Herhangi bir makine tasarımında kullanılacak makine parçalarının mühendislik tasarımlarında malzemelerin çalıştığı yüklerle dayanıp dayanamayacağı  $\sigma$ - $\epsilon$  eğrileri ile belirlenir. Şekil 2.22'de düşük karbonlu çeliğe ait  $\sigma$ - $\epsilon$  grafiği görülmektedir.



Şekil 2.22. Düşük karbonlu çeliğe ait  $\sigma$ - $\epsilon$  grafiği (Gök vd., 2018).

Numuneye bir çekme kuvveti uygulandığında boyunda bir uzaman meydana gelecektir. Bu kuvvet kaldırıldıktan sonra numune eski boyutlarına dönüyorsa numunede elastik deformasyon meydana gelmiştir. Gerilme ve şekil değiştirme eğrisinin yük altında doğrusal olarak ilerlediği kısım elastik deformasyonu gösterir ve burada Hooke Kanunu geçerlidir. Kesitte oluşan gerilme değerinin, birim şekil değişimine oranı malzemenin elastisite modülünü verir.

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (2.1)$$

$\sigma$  = Gerilme (MPa)

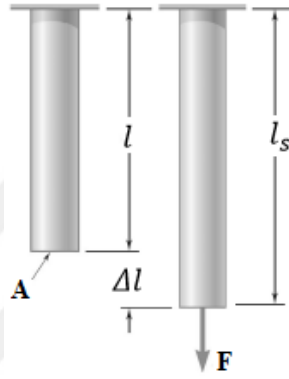
$\epsilon$  = Birim Şekil Değişimi

$E$  = Elastisite Modülü (MPa)

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} \quad (2.2)$$

Gerilme altındaki uzamanın miktarı Şekil 2.23' de görüldüğü gibi son boyun ( $l_s$ ) ilk boydan ( $l$ ) çıkartılması ve bu farkın ilk boya bölünmesiyle birim şekil değişimi bulunur.

$$\Delta l = l_s - l \quad (2.3)$$



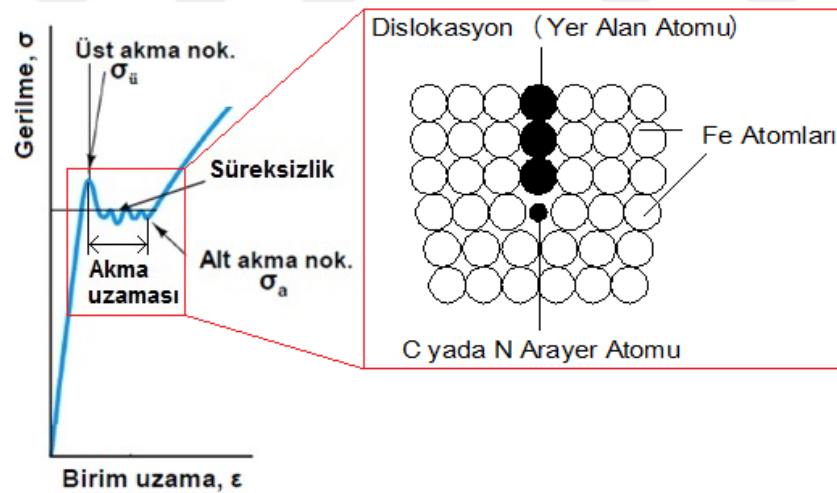
Şekil 2.23. Gerilme altındaki uzamanın miktarı (Gök vd., 2018).

**Orantı Sınırı ( $\sigma_0$ ):** Hooke Kanununun geçerli olduğu bölgedir. Numuneye uygulanan gerilme bir sınıra kadar birim şekil değişimi ile orantılı olarak artar. Bu sınır noktasına orantı sınırı denir. Gerilme ve şekil değiştirme eğrisinin yük altında doğrusal olarak ilerlediği kısım elastik deformasyonu gösterir ve burada Hooke Kanunu geçerlidir. Kesitte oluşan gerilme değerinin, birim şekil değişimine oranı malzemenin elastisite modülünü verir.

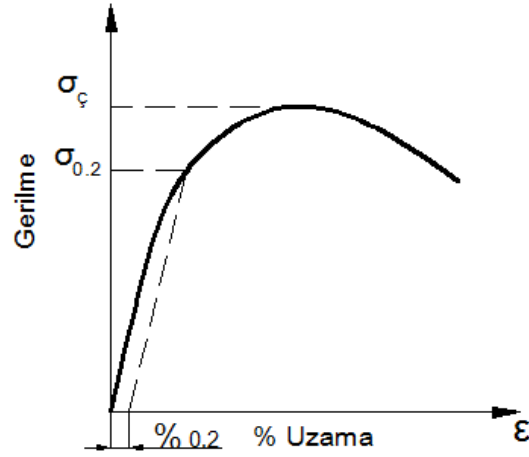
**Elastisite Sınırı ( $\sigma_e$ ):** Malzemeye uygulanan kuvvetin etkisi kaldırıldığı zaman plastik olarak şekil değişiminin görülmediği sadece elastik olarak bir şekil değişiminin meydana geldiği en yüksek gerilme değeri olarak ifade edilir. Bu sınır birçok kaynakta orantı sınırı ile aynı kabul edilir. Pratik uygulamalarda  $\sigma_e$  için %0,01 ya da %0,005 şekil değişimine karşılık gelen gerilme değeri alınır ( $\sigma_{0,01}$  veya  $\sigma_{0,005}$ ).

**Akma mukavemeti ( $\sigma_a$ ):** Kalıcı deformasyonun başladığı noktadır. Çekme numunesine uygulanan kuvvet numunenin ilk kesit alanına bölünerek hesaplanır. Numuneye uygulanan çekme kuvvetinin yaklaşık olarak sabit kalmasına karşın, plastik şekil değiştirme miktarının kayda değer derecede arttığı ve  $\sigma$ - $\varepsilon$  grafiğinin tırtıklı bir davranış gösterdiği bölgedir. Özellikle düşük karbonlu çeliklerde şekil değiştirmede en etkili mekanizma olan kayma işleminin gerçekleştirilmesini sağlayan dislokasyonlar, karbon (C) ve azot (N) gibi arayer

atomları ile karşılaşarak engellenir ve bu durum deformasyon sertleşmesine sebep olurlar. Bu engellemeyi yapan arayer atom guruplarına “Cottrell atmosferi” denir. Numuneye kuvvet uygulanmaya devam edildiğinde dislokasyonların tekrar harekete geçebilmesi için daha fazla kuvvete ihtiyaç duyulacaktır. Dislokasyonlar, uygulanan kuvvet eksenine  $45^\circ$  açıda en iyi kaymayı göstererek hareket ederler. Artan gerilme ile Cottrell atmosferi engelini aşan dislokasyonlar bir boşluğa düşer ve gerilme azalarak akma uzaması bölgesinde iniş gözlenir (Şekil 2.24). Dislokasyonlar yeniden Cottrell atmosferi engeli ile karşılaştıklarında, yoluna devam edebilmesi için daha fazla gerilmeye ihtiyaç duyulmaktadır ve bunun sonucu olarak akma uzama bölgesinde çıkış gözlenir. Cottrell atmosferinden dolayı gerilmenin tekrarlı olarak iniş-çıkış tavrı sergilediği bu akma uzaması bölgesinde tırtıklı bir davranış gözlenir [6]. Akmanın başladığı gerilme değerine Üst Akma Noktası ( $\sigma_{\bar{u}}$ ), akmanın devam ettiği ortalama akma mukavemeti değerine Alt Akma Noktası ( $\sigma_a$ ) denir. Akma mukavemeti çekme diyagramında özellikle belirgin akma gösteren düşük karbonlu çeliklerde o andaki kuvvetin ( $F_a$ ) ilk kesite ( $A_0$ ) bölünmesiyle hesap edilir. Dökme demir gibi belirgin bir akma göstermeyen gevrek malzemelerde ise Akma mukavemeti % 0,2 plastik şekil değişimine ( $\epsilon_{plastik} = 0,002$ ) denk gelen gerilme değerine eşittir (Şekil 2.25) (Gök vd., 2018).



**Şekil 2.24.** Cottrell atmosferinden dolayı gerilmenin tekrarlı olarak iniş-çıkış tavrı sergilediği akma uzaması bölgesi (Gök vd., 2018).



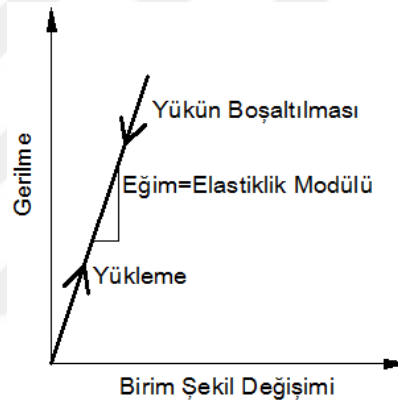
**Şekil 2.25.** Dökme demir gibi belirgin bir akma göstermeyen gevrek malzemelerde Akma mukavemeti (Gök vd., 2018).

**Çekme mukavemeti ( $\sigma_c$ ):** Malzemenin dayanabileceği maksimum gerilme değeridir. O andaki çekme kuvvetinin ( $F_c$ ), numunenin ilk kesit alanına ( $A_0$ ) bölünmesiyle hesaplanır.  $F_c$ , çekme eğrisinde oluşan maksimum çekme gerilmesinin oluşmasına sebep olur. Malzeme bu gerilme değerine ulaşana kadar deney numunesinin kesit alanı homojen bir şekilde azalma gösterirken pekleşmeden dolayı gerilmeye bir artış gözlenir. Kesit azalırken pekleşme etkisinden dolayı gerilme artmakta ve homojen deformasyon bölgesini oluşturmaktadır. Bu bölge akma mukavemeti ile çekme mukavemeti arasındaki bölgedir.

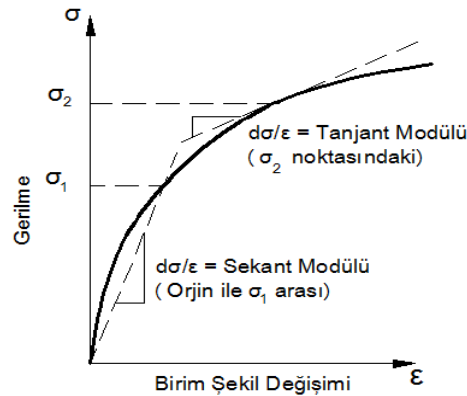
**Kopma mukavemeti ( $\sigma_k$ ):** Gerilmenin maksimumuna ulaştığı noktaya çekme mukavemeti (Çekme Gerilmesi) denilmiştir. Bu noktadan sonra çekme numunesi kesitinde yerel olarak bir büzülme görülür ve pekleşme etkisini kaybederek gerilme sürekli olarak azalır. Bir noktadan sonra numune kuvveti karşılayamayarak kopmaktadır. Kopmanın olduğu bu noktaya malzemenin kopma mukavemeti (kopma gerilmesi) denir. Çekme mukavemeti ile kopma mukavemeti arasındaki bu düzensiz bölgeye heterojen bölge adı verilir.

**Elastisite Modülü (E):** Elastisite modülü, rijitlik yani bir malzemenin elastik şekil değişimine karşı gösterdiği direnç olarak düşünülebilir. Elastisite modülünün yüksek olması, malzemenin rijit olduğu ya da uygulanan bir gerilme sonucu oluşan elastik birim şekil değişiminin küçük olacağı anlamına gelir. Elastisite modülü, elastik sehim hesaplamalarında çok önemli bir tasarım parametresidir.

Elastik şekil değıştirme kalıcı değildir. Uygulana yük kaldırıldığında numunenin ilk şekline (orijinal) geri döneceği anlamına gelir. Şekil 2.26'da verilen  $\sigma$ - $\epsilon$  grafiğinde de görüleceği gibi, yükün uygulanması orijinden yukarı doğru düz bir çizgi boyunca olan hareket karşılık gelirken, yük kaldırıldığında grafik ters yöne doğru hareket ederek orijine geri dönmektedir. Gri dökme demir, beton ve birçok polimerde ve benzeri bazı malzemelerde  $\sigma$ - $\epsilon$  grafiğindeki elastik kısım doğrusal değildir. Bundan dolayı daha önce tanımlanan şekilde elastisite modülünün belirlenmesi mümkün değildir. Doğrusal olmayan bu davranış için genellikle tanjant ve sekant modülleri kullanılır. Belirli bir gerilme değeriinde eğrinin eğimi tanjant modülünü verir. Sekant modülü ise grafikte orjinden başlayan ve  $\sigma$ - $\epsilon$  grafiği üzerinde verilen bir noktayı kesen doğrunun eğimidir (Şekil 2.27) (Gök vd., 2018).



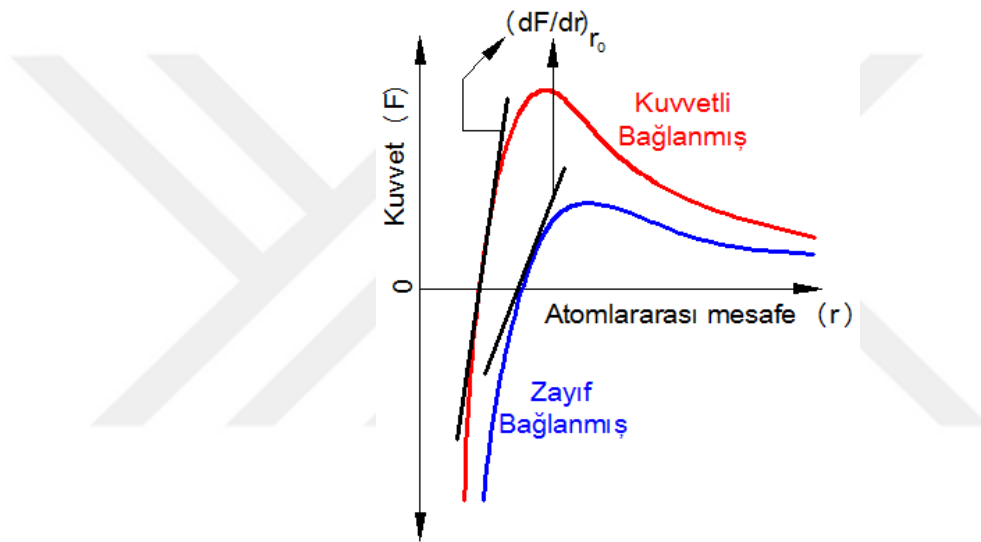
**Şekil 2.26.** Uygulana yükün kaldırılmasından sonra doğrusal elastik şekil değışimi (Gök vd., 2018).



**Şekil 2.27.** Doğrusal olmayan elastik davranış gösteren malzemelerde Tanjant ve Sekant modülleri (Gök vd., 2018).

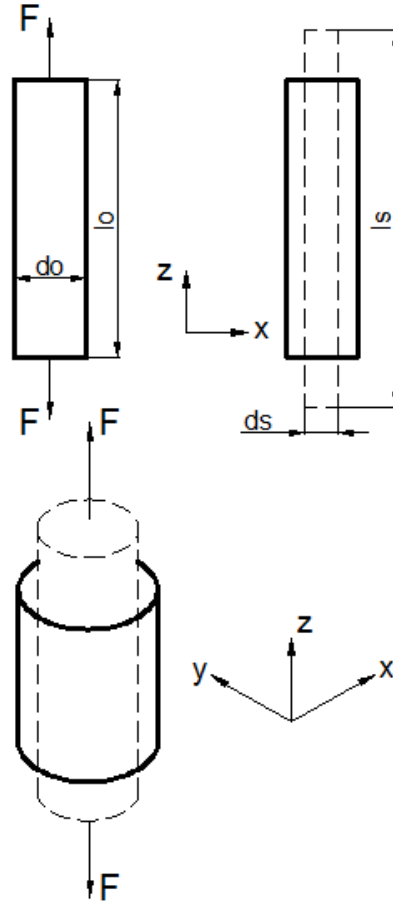
Makro ölçekteki elastik şekil değişimi, atomsal mertebede, atomlar arası mesafede meydana gelen çok küçük miktarda değişmelerle ve buna bağlı olarak atomlar arası bağların gerilmesiyle kendini gösterir. Sonuç olarak, elastisite modülünün büyüklüğü, komşu atomların birbirlerinden ayrılmaya karşı gösterdikleri direncin yani atomlar arası bağ kuvvetinin bir ölçütüdür. Ayrıca elastisite modülü, atomlar arası bağ kuvveti-mesafe eğrisinde denge konumunda; aşağıdaki eğrinin eğimiyle orantılıdır (Genel, 2015).

$$E\alpha\left(\frac{dF}{dr}\right)_{r_0} \quad (2.4)$$



**Şekil 2.28.** Kuvvetli ve zayıf bağlara sahip malzemede kuvvetin atomlar arası mesafeye göre değişimi (Elastisite modülünün değişimi) (Gök vd., 2018).

**Poisson Oranı:** Tek eksenli çekme altında numunenin yanal uzamasının, boyuna olan uzamasına oranı olarak tarif edilmektedir. Şekil 2.29’ da dairesel kesitli bir numuneye tek eksenli çekme kuvveti uygulandığında meydana gelen poisson oranı, Şekil 2.30’ da ise kare kesitli bir numuneye tek eksenli çekme kuvveti uygulandığında meydana gelen poisson oranının formülü verilmiştir. Çekme altında numunenin boyunda uzama meydana gelirken, kesit alanında ise daralma meydana gelmektedir. Hemen hemen yapısal malzemelerin çoğunda bu durum söz konusudur.  $\epsilon_x$  ve  $\epsilon_z$  değerleri ters işaretli olduğundan önündeki (-) işareti kesitteki daralmadan kaynaklanan (küçük çap-büyük çap) bir durumdur (Gök vd., 2018).



Şekil 2.29. Dairesel kesitli bir numunede poisson oranının belirlenmesi (Gök vd., 2018).

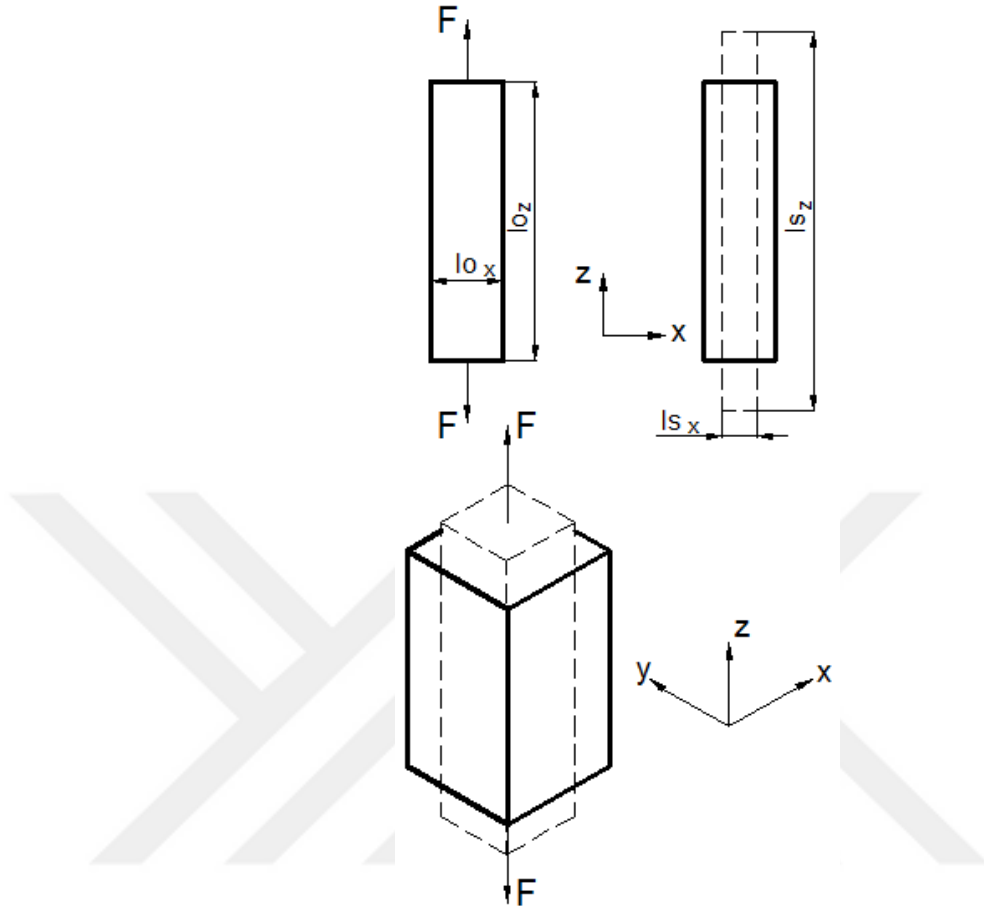
$$\varepsilon_x = \frac{d_s - d_0}{d_0} \quad (2.5)$$

$$\varepsilon_y = \frac{d_s - d_0}{d_0} \quad (2.6)$$

$$\varepsilon_z = \frac{l_s - l_0}{l_0} \quad (2.7)$$

$$\nu = -\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_z} = -\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_z} \quad (2.8)$$





**Şekil 2.30.** Kare kesitli bir numunede poisson oranının belirlenmesi (Gök vd., 2018).

$$\varepsilon_x = \frac{l_{sx} - l_{ox}}{l_{ox}} \quad (2.9)$$

$$\varepsilon_y = \frac{l_{sy} - l_{oy}}{l_{oy}} \quad (2.10)$$

$$\varepsilon_z = \frac{l_{sz} - l_{oz}}{l_{oz}} \quad (2.11)$$

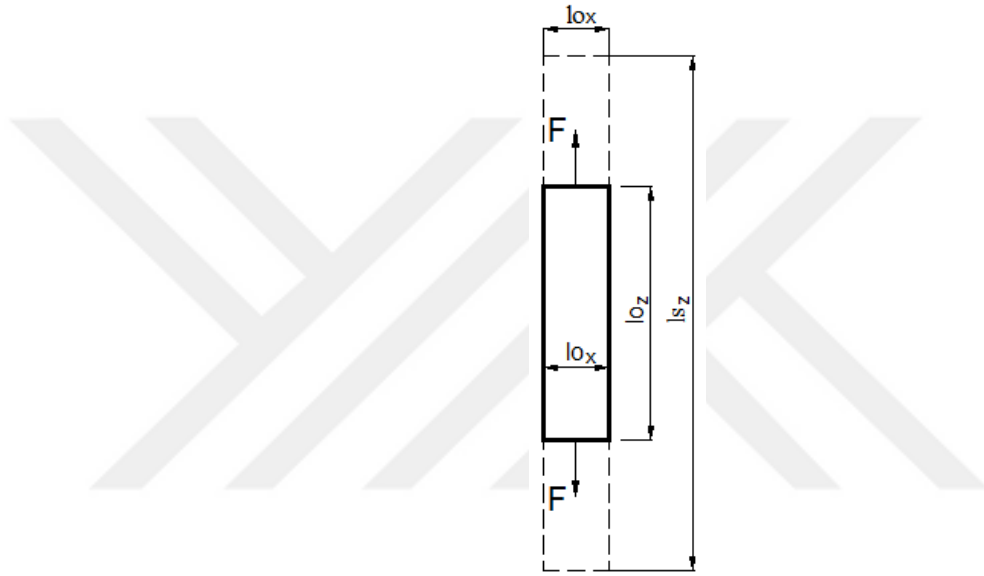
$$\nu = -\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_z} = -\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_z} \quad (2.12)$$

Poisson oranı özellikle sonlu elemanlar metoduna dayalı analizlerde malzemelerin mekanik özelliklerini tanımlamada çok önemlidir. İdeal bir malzemelerde herhangi bir yanal ya da boyuna uzama olmadığı düşünülürse  $\nu = 0$  olarak kabul edilir. Şişe mantarı buna örnek olarak gösterilebilir. Çekme doğrultusunda uzama olurken numunenin çapında herhangi bir değişim olmamaktadır (Gök vd., 2018).

$$\varepsilon_x = \frac{l_{s_x} - l_{o_x}}{l_{o_x}} = \frac{l_{o_x} - l_{o_x}}{l_{o_x}} = \frac{0}{l_{o_x}} = \varepsilon_x = 0 \quad (2.13)$$

$$\varepsilon_y = \frac{l_{s_y} - l_{o_y}}{l_{o_y}} = \frac{l_{o_y} - l_{o_y}}{l_{o_y}} = \frac{0}{l_{o_y}} = \varepsilon_y = 0 \quad (2.14)$$

$$\nu = -\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_z} = -\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_z} = \frac{0}{\varepsilon_z} = \nu = 0 \quad (2.15)$$

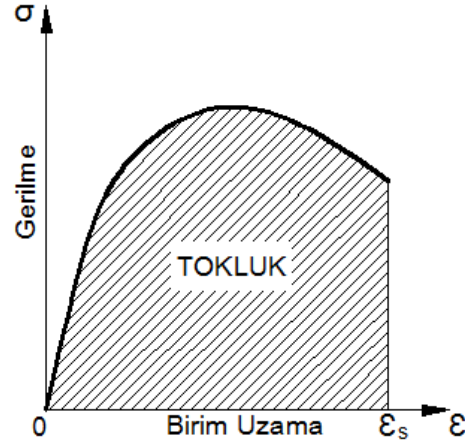


Şekil 2.31. Kare kesit (Gök vd., 2018).

Bazı durumlarda hacmin sabit kaldığı için ( $1 - 2\nu = 0$ ) poisson oranı en büyük değerini alır ( $\nu = 0,5$ ). Örneğin sıvılar hidrostatik basınç altında sıkıştırılmazlar. Poisson oranı 0 ile 0,5 arasında bir değer almaktadır. Metallerde ise bu değer genellikle 0,25 ile 0,35 arasında değişmektedir. Bazı çok özel malzemeler ise çekme doğrultusuna dik doğrultuda genişlemektedirler. Bu durumda  $\varepsilon_x$  ve  $\varepsilon_y$  değerleri pozitif çıkmaktadır. Poisson oranı ise negatif (-) olmaktadır. Özel polimer köpükler ve inek memesi bunlara örnek olarak verilebilir. Bu malzemelere egzotik malzemeler denilmektedir (Genel, 2015).

**Tokluk:** Deformasyona uğrayan bir malzemenin kırılıncaya kadar gösterdiği yani depoladığı enerji olarak tanımlanır.  $\sigma$ - $\varepsilon$  grafiğinin altında kalan tüm alanın toplanması ile bulunur.  $\varepsilon_s$  Malzemede kırılıncaya kadar oluşan birim uzama ya da şekil değişimi miktarıdır (Şekil 2.32). Malzemenin yüksek tokluğa sahip olması istenen bir özelliktir. Gevrek malzemelerin tokluğu sünek malzemelere göre daha düşüktür.

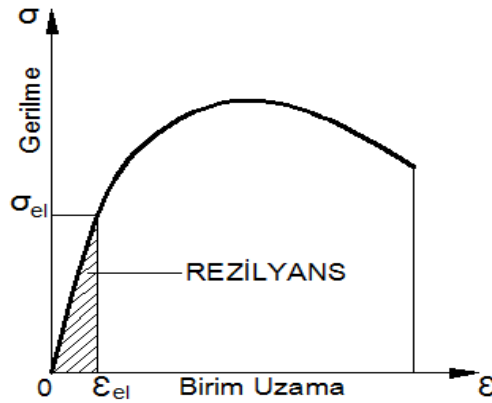
$$Tokluk = \int_0^{\epsilon_s} \sigma \cdot d\epsilon \quad (2.16)$$



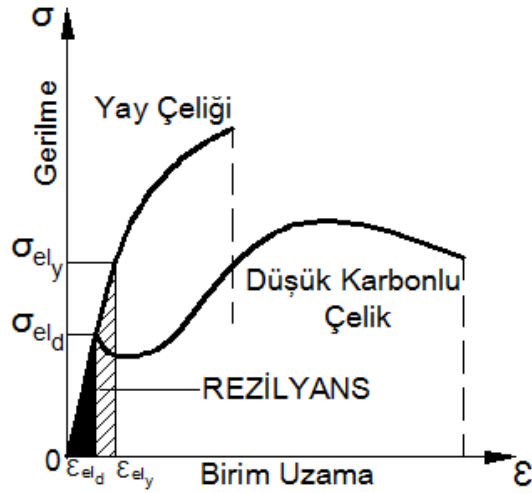
Şekil 2.32.  $\sigma$ - $\epsilon$  grafiğinde tokluğun belirlenmesi (Gök vd., 2018).

**Rezilyans:** Malzemenin elastik şekil değiştirme sırasında depoladığı enerji olarak tanımlanır.  $\sigma$ - $\epsilon$  grafiğinde elastik bölgenin altında kalan alanı temsil eder (Şekil 2.33). Eğer elastik sınır içerisinde malzemeye yük uygulanırsa ve yük boşaltıldığında malzeme eski haline döner. Şekil 2.34’de düşük karbonlu çelik ve yay çeliğinin rezilyans davranışları görülmektedir. Yay çeliğinin rezilyans davranışı daha yüksektir. Bu durum yay çeliğinin elastikiyet modülünün düşük karbonlu çeliğe göre daha yüksek olması ile açıklanabilir.

$$Rezilyans = \frac{\sigma_{el} \cdot \epsilon_{el}}{2} \quad (2.17)$$



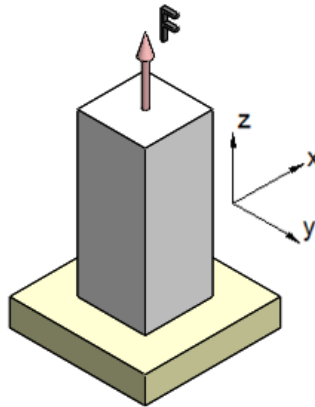
Şekil 2.33.  $\sigma$ - $\epsilon$  grafiğinde rezilyansın belirlenmesi (Gök vd., 2018).



Şekil 2.34. Düşük karbonlu çelik ve yay çeliğinin rezilyans davranışları (Gök vd., 2018).

#### 2.4.4. E, G ve $\nu$ arasındaki İlişki

Bilgisayar destekli mühendislik hesaplarında malzemelerin doğrusal izotropik bölgede en önemli mekanik özelliklerinden olan elastisite modülü (E), kayma modülü (G) ve poisson oranı ( $\nu$ ) gibi mekanik özellikler çok önemlidir. Bu özellikler arasındaki ilişki aşağıdaki gibi gösterilebilir. Şekil 2.35'deki homojen bir çubuk, aksenal olarak yüklendiğinde oluşan gerilme ve deformasyon, malzemenin  $\sigma$ - $\epsilon$  grafiğinde elastik limiti aşmadığı sürece Hooke kanunu geçerlidir. Y eksenini doğrultusundaki F yükünün A kesitine uygulamış olduğu çekme gerilmesi ve malzemenin elastisite modülü (E) olmak üzere Hooke kanunundan y yönündeki şekil değişimi hesaplanabilir (Soyuçok, 2015).

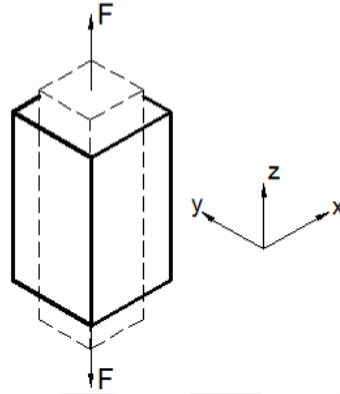


Şekil 2.35. Aksenal olarak yüklenen homojen çubuk (Gök vd., 2018).

$$\sigma_z = \frac{F}{A} \quad (2.18)$$

$$\varepsilon_z = \frac{\sigma_z}{E} \quad (2.19)$$

Poisson oranının bir malzeme için önemli bir katsayı olduğunu söylemiştik. Çekme doğrultusuna dik yöndeki şekil değiştirmeler aşağıdaki gibi formüle edilebilir.



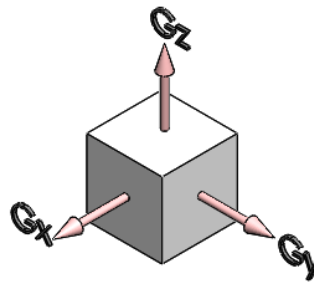
**Şekil 2.36.** Eksenel çekme kuvvetine maruz kalmış çubuğun kuvvet yönüne dik doğrultuda daralması (Gök vd., 2018).

$$\nu = -\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_z} = -\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_z} \quad (2.20)$$

$$\varepsilon_z = \frac{\sigma_z}{E} \quad (2.21)$$

$$\varepsilon_x = \varepsilon_y = -\nu\varepsilon_z = -\nu\frac{\sigma_z}{E} \quad (2.22)$$

Çok eksenli yükleme halinde ise (Şekil 2.37) aşağıdaki denklemler elde edilir.



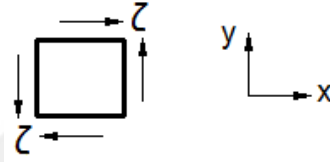
**Şekil 2.37.** Çok eksenli yükleme durumunda birim elemanın deformasyonu (Gök vd., 2018).

$$\varepsilon_x = +\frac{\sigma_x}{E} - \nu\frac{\sigma_y}{E} - \nu\frac{\sigma_z}{E} \quad (2.23)$$

$$\varepsilon_y = +\frac{\sigma_y}{E} - \nu\frac{\sigma_x}{E} - \nu\frac{\sigma_z}{E} \quad (2.24)$$

$$\varepsilon_z = +\frac{\sigma_z}{E} - \nu\frac{\sigma_x}{E} - \nu\frac{\sigma_y}{E} \quad (2.25)$$

E, G ve  $\nu$  arasındaki ilişki için Şekil 2.38'deki birim elemana kayma gerilmesi uygulandığında,



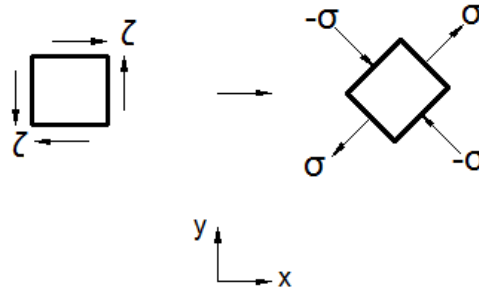
Şekil 2.38. Birim eleman (Gök vd., 2018).

$$\varepsilon_x = +\frac{\sigma_x}{E} - \nu\frac{\sigma_y}{E} - \nu\frac{\sigma_z}{E} \quad (2.26)$$

$$\sigma_z = \varepsilon_z = 0 \quad (2.27)$$

$$\varepsilon_x = +\frac{\sigma_x}{E} - \nu\frac{\sigma_y}{E} \quad (2.28)$$

Şekil 2.39'da birim elamana uygulanan kayma gerilmesi sonucu oluşan normal gerilmeler görülmektedir.



Şekil 2.39. Birim elamana uygulanan kayma gerilmesi (Gök vd., 2018).

$$\varepsilon_x = +\frac{\sigma_x}{E} - \nu\frac{-(\sigma_y)}{E} \quad (2.29)$$

$$\varepsilon_x = +\frac{\sigma_x}{E} + \nu\frac{\sigma_y}{E} \quad (2.30)$$

Kayma gerilmesi kuvvetin uygulandığı yöne  $45^\circ$  açıda maksimum değerini alır ve birim kare elemanda normal gerilmeler ve şekil değiştirmeler birbirine eşittir.

$$\sigma_x = \sigma_y = \sigma \quad (2.31)$$

$$\varepsilon_x = \varepsilon_y \quad (2.32)$$

$$\varepsilon_x = +\frac{\sigma_x}{E} + \nu \frac{\sigma_y}{E} \quad (2.33)$$

$$\varepsilon = +\frac{\sigma}{E} + \nu \frac{\sigma}{E} \quad (2.34)$$

$$\varepsilon = +\frac{\sigma}{E}(1 + \nu) \quad (2.35)$$

Birim şekil değiştirme, kayma şekil değiştirmenin yarısına eşittir.

$$\frac{\gamma}{2} = +\frac{\sigma}{E}(1 + \nu) \quad (2.36)$$

45 derecelik kayma düzleminde normal ve kayma gerilmeleri birbirine eşittir.

$$\frac{\gamma}{2} = +\frac{\tau}{E}(1 + \nu) \quad (2.37)$$

$$\gamma E = 2\tau(1 + \nu) \quad (2.38)$$

$$\frac{\gamma E}{\gamma} = \frac{2\tau(1+\nu)}{\gamma} \quad (2.39)$$

$$E = \frac{\tau}{\gamma} 2(1 + \nu) \quad (2.40)$$

$$E = 2G(1 + \nu) \quad (2.41)$$

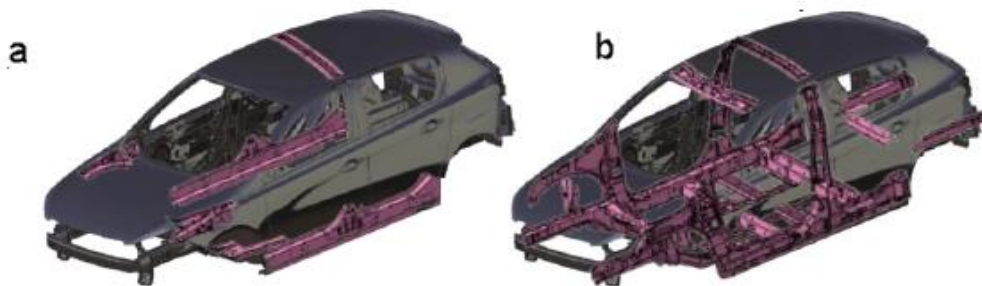
### 3. ÇİFT FAZLI ÇELİKLER

Motorlu taşıtlarda kütle azaltımı ihtiyacından dolayı 1950'li yıllarda Yüksek Mukavemetli Düşük Alaşım (YMDA) çeliklerinin kullanımına başlanmıştır. Yüksek mukavemet değerleri iyi olmasının yanı sıra şekillendirme kabiliyetlerinin iyi olmaması bu çelikler için bir dezavantaj oluşturmuştur. Bu sebepten yeni bir çelik arayışına başlanmıştır. YMDA çeliklerden üretilen bu yeni çift fazlı çelikler yüksek dayanım özelliği ve sünek olması sebebiyle çok iyi şekillendirme kabiliyetine sahiptir. Böylece YMDA çeliklerin yerini almayı başarmıştır (Davies, 1978).

Çift fazlı çeliklerin yüksek dayanıma sahip olmaları Yüksek Mukavemetli Çelikler'e (HSS) göre yüksek şekillendirilebilirlik, iyi kaynak edilebilme, piyasada ulaşılma kolaylığı ve daha düşük maliyet avantajları sayesinde en çok tercih edilen Geliştirilmiş Yüksek Mukavemet Çeliği'dir (AHSS) (Wang ve Wei, 2013).

Çift fazlı çeliklerin bir diğer önemli avantajı ise mikro yapılarındaki martenzitin hacimsel oranı ve yayılımı değiştirilerek farklı mukavemet ve form verilebilirlik değerlerinde kolaylıkla elde edilebilmeleridir. Bu özellikleri sayesinde istenilen sertlikte üretilebilmeleri tercih edilmeleri için en önemli sebeplerden biri olmuştur (Samek ve Krizan, 2012).

Şekil 3.1'de gösterilen 1. nesil Peugeot 308 modelinde araçta sadece 7 parça çift fazlı sac malzeme kullanılmışken, 2. nesil modelde aracın gövde ağırlığının %26'sını çift fazlı sac malzemeler oluşturmaktadır (Patois ve Barbier, 2014).



**Şekil 3.1.** Peugeot 308'de DP çeliği kullanımı: (a) 2008 model 1. nesil, (b) 2014 model 2. Nesil. (Patois ve Barbier, 2014).

Çift fazlı çeliklerin oluşturulma yöntemleri;

- Sürekli tavlama-sıcak haddeleme,



- Sürekli tavlama soğuk haddeleme,
- Kutu tavlama
- Sıcak haddeleme yöntemleri olarak sıralanabilir (Speich vd., 1981).

Bu yöntemlerde soğuma oranları farklıdır ve bu farklılığından dolayı, kullanılan çelik alaşımının martenzitik dönüşümü gerçekleştirebilmesi kritik bir öneme sahiptir (Llewellyn ve Hillis, 1996). Martenzitik dönüşümün gerçekleşmesini sağlayacak olan çelik alaşımının bunun yanı sıra çift fazlı çeliklerden beklenen özellikleri bütünüyle sağlaması, kırılma bileşikler meydana getirip çift fazlı çeliklerden beklenen en önemli özellik olan sünekliğe zarar vermemesi gereklidir.

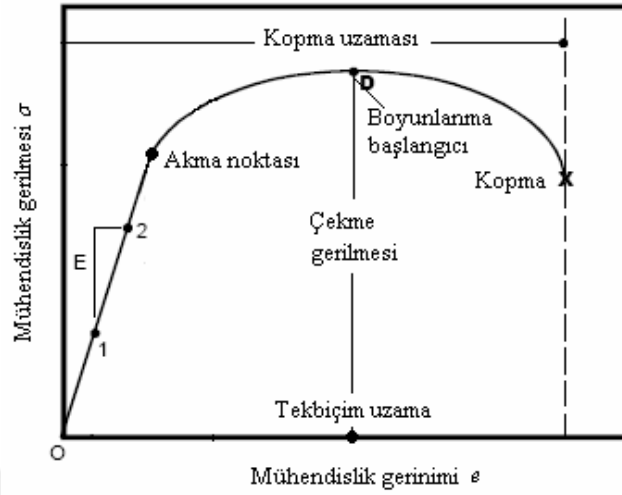
Çift fazlı çeliklerin tercih edilmesini sağlayan önemli özellikler:

- Sürekli akma davranışı,
- Düşük akma/çekme dayanımı oranı,
- Yüksek çalışma sertleşmesi oranı,
- Yüksek düzeyde uniform toplam uzama oranıdır (Rashid, 1977).

Sahip olduğu bu tüm önemli özellikler çift fazlı çelikleri sektörde özellikle otomotiv sanayinde en çok tercih edilen malzeme türlerinden biri yapmıştır.

### 3.1. Çift Fazlı Çeliklerin Mekanik Özellikleri

Üretilen çelik sacların şekillendirme işlemlerine başlanmadan önce şekillendirmenin gerçekleştirilebilmesi veya kullanılacakları yerlerde beklenen özellikleri sağlayarak, örnek olarak güvenlik bölgesinde kullanılacak bir parçanın zorlanmalara karşı dayanabilmelerinin sağlanması amacıyla mekanik özelliklerinin önceden bilinmesinin önemi büyüktür (Değirmenci, 2006).

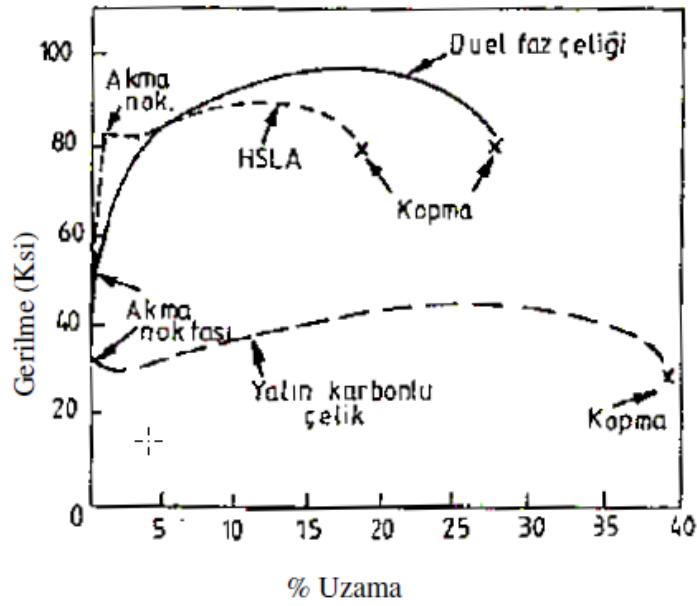


**Şekil 3.2.** Mühendislik gerilmesi – mühendislik gerinimi eğrisinin temel nitelikleri (Değirmenci, 2006).

Çeliklerin şekillendirilmesinde etken olan çekme testinden elde edilen mekanik özellikler; akma mukavemeti, çekme mukavemeti, elastisite modülü, tek yönlü uzama, kopma uzaması, kopmada büzülme yüzdesi, pekleşme üsteli, plastik gerinim oranı ve gerinim hızına duyarlılık üsteli gibidir. Şekil 3.2’de gösterilen tek eksenli çekme testinden elde edilen basit mühendislik gerilmesi - mühendislik gerinimi eğrisinin niteliklerini örneklemektedir (Değirmenci, 2006).

### 3.1.1. Akma mukavemeti

Akma mukavemeti, malzemenin gerilme-gerinim eğrisinde, başlangıç elastik eğimin sapmaya başladığı noktada ölçülen gerilme değeridir. Çift fazlı çeliklerde, çekme testlerinden elde edilen gerinim gerilme eğrisine bakıldığında akma alanı net olarak görülmez ve akma dayanımı genelde düşük seviyededir. Çift fazlı çeliklerin akma sınırlarının düşük alaşımli yüksek mukavemetli çeliklerle karşılaştırılması Şekil 3.3’de verilmiştir. Ferrit ve östenitin ferrit ve martenzite ( $\alpha+\gamma \rightarrow \alpha+M$ ) dönüşümü sırasında ferrit tanelerindeki hacimsel büyümelerin sonucu ortaya çıkan iç uzama enerjisi ve oluşan tanelerin şekil bozukluğunun nedeni çift fazlı çeliklerin akma sınırlarının belli olmaması ve akma mukavemet değerlerinin düşük değerlerde olmasıdır (Davies, 1978).



**Şekil 3.3.** Çift fazlı çelik ve yüksek mukavemetli düşük alaşımlı çeliklerin uzama ve gerilme ilişkisi (Bolvadin, 1990).

Akma gerilmesi, martenzit fazının karbon içeriğine göre değişiklik göstermez. Martenzit hacim oranına bağlı olarak akma doğrusal bir değişim gösterir (Davies, 1978). Çift fazlı çeliklerin akma ve çekme dayanımlarını martenzit hacim oranıyla ilişkisini gösteren formüller, Davies tarafından aşağıdaki şekilde belirlenmiştir;

$$\sigma_{0.1} = 103 + 11.1 \%MHO \text{ MPa} \quad (3.1)$$

$$\sigma_{0.2} = 172 + 15.5 \%MHO \text{ MPa} \quad (3.2)$$

$$\sigma_{\epsilon} = 285 + 8.3 \%MHO \text{ MPa} \quad (3.3)$$

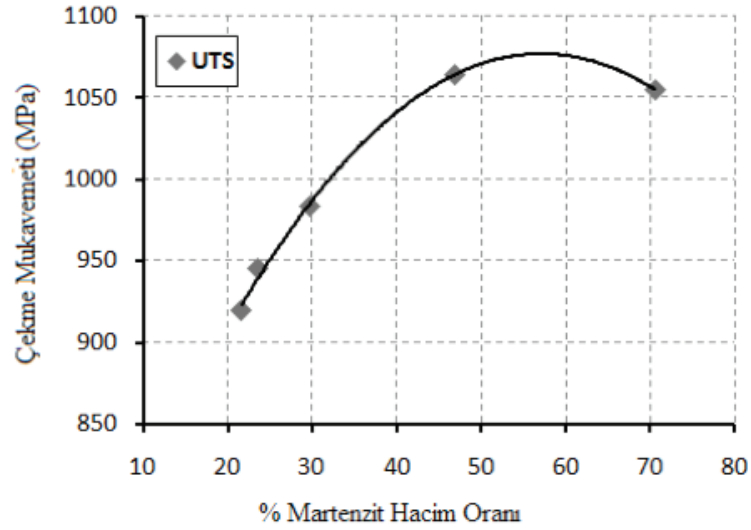
Çift fazlı çeliklerin tercih edilmesini sağlayan en ideal dayanım-süneklik değerleri için martenzit hacim oranı değerinin %15-25 civarında ve kullanılan malzemenin karbon oranının %0.3'ten az olması istenir. Çift fazlı çeliklerin dayanımını arttırabilmek için östenitin miktarca artması ve sertliğini arttırıcı alaşımlar eklenmesi gerekir, bu alaşım elementleri (Mn, Cr, Mo, V, Ni vb.) ilave edilerek alaşımlandırma işleminin sağlanması gereklidir. Eklenen alaşım elementlerinin oranları ferritin yapısını bozmayacak şekilde olmalıdır (Giordano vd., 1991).

Çift fazlı çelikler, faz hacim oranların ve diğer faktörler kontrol altına alınarak istenilen sertlik değerlerinde elde edilebilir. Çift fazlı çeliklerin akma ve çekme mukavemetlerinde martenzit yapısı, hacim oranı ve karbon içeriğinin yanı sıra ferrit fazı özellikleri de istenilen özelliklerin doğruluğunda etkilidir.

### 3.1.2. Çekme mukavemeti

Çekme testi boyunca malzemenin mühendislik eğrisinde görülen en yüksek gerilme, çekme mukavemeti olarak adlandırılmaktadır. Martenzit hacim oranındaki artış, çekme mukavemetini artırmakta, martenzit partikül çapındaki artış ise çekme mukavemetini etkilememektedir. Çift fazlı çeliklerde martenzitik dönüşüm nedeniyle, ferrit tane sınırlarında meydana gelen hareketli dislokasyonlar, sürekli akmaya neden olur. Fakat yüksek tavlama sıcaklığı nedeniyle, martenzit partikülleri arasındaki mesafenin büyük olması ya da yavaş soğuma nedeniyle, yapıda martenzitle beraber perlitin bulunması süresiz akmaya neden olabilir (Çimenoglu, 1984).

Çift fazlı çeliklerin içeriğindeki martenzit miktarıyla veya martenzitin sertliğinin artması ile çekme dayanımı artar. Martenzitin sertliği karbon miktarına bağlıdır, bunun yanı sıra tane boyutlarının küçük olması da martenzitin sertliğini arttıran bir özelliktir. Dayanımı arttıran bir diğer faktör ise ferrit fazının sertliğinin artmasıdır. Ferrit fazının sertliğin etkileyen durumlar tane boyutu ve alaşım elementleridir. Şekil 3.4'de martenzit hacim oranındaki artışla çekme mukavemeti ilişkisi gösterilmiştir. %50-60 martenzit hacim oranına kadar çekme mukavemetinin arttığı söylenebilir. Martenzit hacim artmasını, martenzitin içerdiği karbon oranının azalmaya başlamasıyla açıklanabilir (Bilir, 2014).



Şekil 3.4. Martenzit hacim oranının çekme mukavemetine etkisi (Bilir, 2014).

### 3.1.3. Elastiklik modülü

Malzemenin gerilme-gerinim eğrisinde başlangıç bölümünde bulunan, akma noktasına kadarki elastik deformasyon bölgesindeki düz eğime göre belirlenen bir faktördür. Elastiklik modülünün ölçümünün doğruluğu için, düşük gerinim hızları ve yüksek veri elde etme hızlarının, %0,5 uzamanın altındaki elastik bölgede kullanılması gerekmektedir (Taylor, 1988).

Elastiklik modülü elastik bölgeyi oluşturan doğrunun eğimine eşittir. (Bu eşitlikte; S nominal gerilme, e % nominal gerinimdir.)

$$S = E \cdot e \quad (3.4)$$

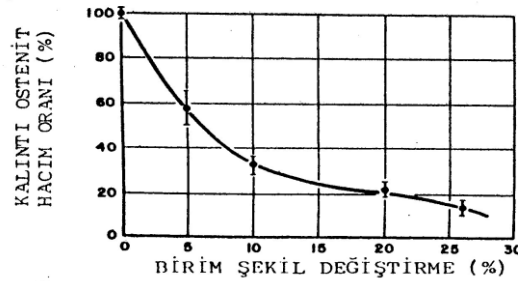
$$E = \arctan \alpha \quad (3.5)$$

### 3.1.4. Süneklik

Malzemenin uygulanan kuvvet doğrultusunda birim şekil değişimine izin vermesi süneklik olarak tanımlanabilir. Gevreklik ise uygulanan kuvvete karşılık veremeyip malzemenin kopmasıdır. Malzeme ne kadar sünekse o kadar iyi şekil değişimine olanak sağlar.

Çift fazlı çeliklerde toplam birim şekil değişimi, artan martenzit hacim yüzdesiyle azalmaktadır (Şekil 3.5). Martenzit fazındaki düşük karbon, sünekliğin artmasına sebep olur. Çift fazlı çeliklerin sünekliğini etkileyen bir diğer bir faz ise ferrit fazıdır. Ferrit fazındaki, karbon ve azot miktarının artması sünekliğin azalmasına yol açar. Çift fazlı çeliklerin yapısında

bulunan büyük miktardaki kalıntı östenitin deformasyon sırasında martenzite dönüşümü, homojen uzamanın artmasına neden olur (Çimenoglu, 1984).



**Şekil 3.5.** Kalıntı östenit hacim oranının birim şekil değişimi üzerindeki etkisi (Çimenoglu, 1984).

Çift fazlı çeliklerin yapısında bulunan büyük miktardaki kalıntı östenitin deformasyon sırasında martenzite dönüşmesi yüzde uzamanın artmasına sebep olur. Şekil 3.5' de, düşük karbonlu çift fazlı çelikte kalıntı östenit hacim oranının şekil değişimine bağlı olarak değişimi gösterilmektedir. Şekilde de görüldüğü gibi ilk %5 şekil değişiminde %50 civarında kalıntı östenit martenzite dönüşmüştür.

Fakat yapıda bulunan kalıntı östenit miktarı az ise veya deformasyon esnasında hemen martenzite dönüşüyorsa, bu fazın yüzde uzama üzerindeki etkisi ihmal edilebilir (Speich vd., 1981).

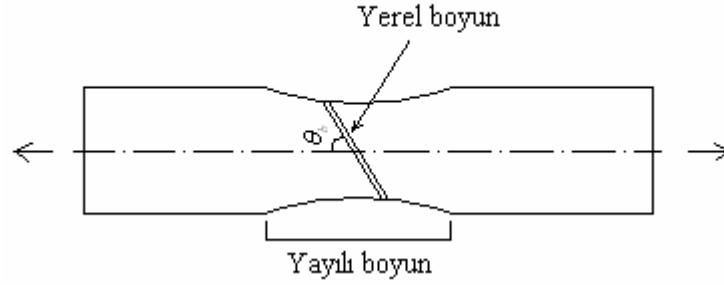
### 3.1.5. Üniform uzama ve kopma uzaması

Çelik malzemelerde iki uzama çeşidi vardır, bunlardan ilki üniform uzama ikincisi ise kopma uzamasıdır. Ulaşılan en yüksek mühendislik gerilmesine karşılık gelen mühendislik gerinimi, maksimum üniform nominal uzama ( $e_u$ ) olarak adlandırılır. Ancak bu noktadaki uzama gerçek uzama değildir. Gerçek maksimum üniform gerinim ( $\epsilon_u$ ) 3.6 eşitliğinden hesaplanmaktadır (Kalpakjian ve Schmid, 2001).

$$\epsilon_u = \ln(1 + e_u) \quad (3.6)$$

Bu noktaya kadar çekme numunesi üniform bir şekilde deformasyona uğrar. Bu noktadan sonra şekil değişimi ilk olarak oldukça geniş bölgede yoğunlaşarak yayılı boyunlanmayı oluşturur ve kopmadan biraz önce de genelde numunenin orta kısmında olan keskin kesit daralması oluşturarak yerel boyunlanmayı meydana getirir. Yayılı boyunlanmanın

oluşmasının nedeni, hızlı bir şekilde kesit daralırken malzemenin pekleşmesi sonucu kesitin yük taşıma kapasitesindeki azalmadır (Çapan, 2003). Bir çekme deneyinde oluşan yayılı ve yerel boyunlanma Şekil 3.6'da görülmektedir.



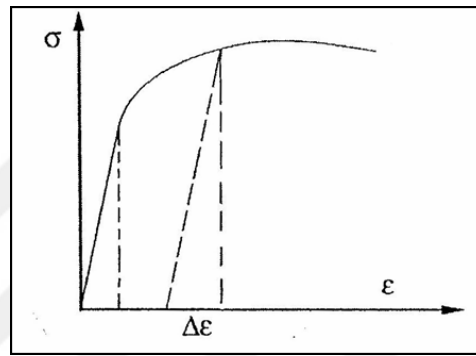
**Şekil 3.6.** Bir çekme numunesinde ortaya çıkan yayılı ve yerel boyunlanma (Çapan, 2003).

Yerel boyunlanma bölgesindeki yoğunlaşma arttıkça parça buradan incelip kopacaktır. Kopma anında mühendislik eğrisinden okunan uzama değeri de kopma veya diğer adıyla toplam uzamadır ( $e_f$ ). Kopma noktasında yüzde uzama, 3.7 eşitliğiyle hesaplanır. Eşitlikte  $L_f$ , kopan parçaların bir araya getirilmesi ile ölçülen boydur (Değirmenci, 2006).

$$\% e_f = \frac{L_f - L_0}{L_0} \times 100 \quad (3.7)$$

#### 4. GERİ ESNEME

Sac malzeme yüksek çekme, germe ve bükme kuvvetleri altında almış olduğu formu bu kuvvetler üzerinden kalktıktan sonra, malzemenin elastik özelliklerinden dolayı parça geometrisinde meydana gelen büyük oranda elastik ender olarak da elastik-plastik değişim olarak tanımlanan bir geometrik değişim gerçekleştirir. Bu duruma örnek olarak sünek bir metalin akma diyagramında yüklemeyi kaldırdıktan sonra malzemenin uzama miktarındaki düşüş gösterilebilir (Şekil 4.1) (Arslan, 2007).

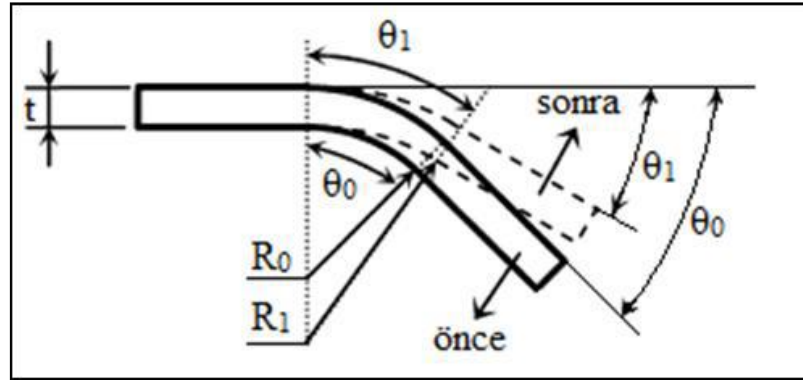


**Şekil 4.1.** Sünek bir metaldeki geri esnemenin akma diyagramı üzerinde gösterilişi (Arslan, 2007).

Geri esnemenin sayısal olarak ifade edilmesinde en çok kullanılan büyüklük “eğrilikteki değişim”dir. Geri esneme hesaplamaları, saca uygulanmasıyla geometriyi bulunduğu duruma getiren kuvvet veya momentin kaldırılması ilkesine dayanır (Arslan, 2007).

Bütün sac malzemelerin belirli bir elastisite modülü olduğundan, plastik deformasyon, parçaya uygulanan yük kaldırıldığı zaman, bir miktar elastik gerileme ile takip edilmektedir. Genelde sac malzeme bası yönündeki gerinim, çeki yönündeki gerinimden daha büyüktür. Parçaya uygulanan kuvvet ile parçanın dış kısmı deforme olurken, iç kısmı henüz akma noktasına ulaşmamıştır. Parçanın üzerinden kuvvet çekildiğinde, malzemenin basılmaya çalışan tarafı uzamaya, malzemenin çekilmeye çalışan tarafı ise kısalmaya çalışmaktadır. Sonuç olarak sac malzeme ilk halini alma eğilimi göstermekte ve bükülen malzeme bir miktar esneyerek geri açılmaya sebep olmaktadır. Malzemenin bu durumu geri esneme olarak adlandırılır. Sac malzemenin bu davranışı şematik olarak Şekil 4.2’de parametreleriyle birlikte gösterilmiştir. Burada dikkat edilecek olursa, geri esnemenin sonraki son bükme açısı daha küçük ( $\theta_1 < \theta_0$ ) ve son bükme yarıçapı öncekine göre daha büyüktür ( $R_1 > R_0$ ). Bükmedeki elastik kısım, bükme işleminden sonra elastikiyetini geri almaya çalışır (Lange, 1985; Güneş, 1989).





**Şekil 4.2.** Bükme işlemi sonrasında oluşan geri esneme (Uslu, 2014).

$$K = \frac{\theta_1}{\theta_0} \quad (4.1)$$

olmak üzere,

$$K = \frac{\left(\frac{2R_0}{e}\right)+1}{\left(\frac{2R_1}{e}\right)+1} \quad (4.2)$$

Burada K, geri esneme faktörü olarak adlandırılır.  $K=1$  olduğunda geri esneme olmadığını,  $K=0$  kalıcı şekil değişimi olmadığını göstermektedir. Geri esnemenin düzlemsel gerilme koşullarında denklemini aşağıdaki Eşitlik 4.3'de gösterilmiştir (Çapan, 2003).

$$\frac{R_0}{R_1} = 4 \left( \frac{R_0 \sigma_{ak}}{Et} \right)^3 - 3 \left( \frac{R_0 \sigma_{ak}}{Et} \right) + 1 \quad (4.3)$$

Buradaki E elastisite modülünü,  $\sigma_{ak}$  akma mukavemetini ifade eder.  $\frac{R}{t}$  oranı ve çekme dayanımı ile geri esneme artarken, elastik modülü ve kalınlık arttıkça geri esneme azalmaktadır (Çapan, 2003).

Parçaların, arzu edilen tolerans sınırlarında kalabilmesi ve nihai geometrinin doğru bir şekilde belirlenebilmesi için geri esneme davranışının önceden tahmin edilmesi gerekmektedir (Tekiner, 2004).

Gerri esnemenin önceden tahmini ve kontrolü, şekil verilen parçanın kalitesini arttırmak ve düşük maliyetli nihai ürünler ortaya çıkarmak açısından çok önemlidir. Gerri esnemenin doğru bir şekilde tahmin edilmesi için geri esneme üzerinde etkili olan sıcaklık, baskı plakası kuvveti, sac kalınlığı, sac genişliği, sürtünme katsayısı, malzeme özellikleri gibi parametrelerin ve bunların varyasyonlarının bilinmesi gerekir. Malzeme özellikleri ve işlem parametrelerine

bağlı olan geri esnemenin yanlış bir şekilde tahmin edilmesi, kalıp maliyetini arttıracak gibi zaman kaybına da yol açacaktır (Gündü, 2000).

Geri esnemenin telafisi yapılırken sonlu elemanlar analiz programlarından yararlanılabilir. Sac parça nihai tolerans değerlerine girmediği zamanlarda uygulanan telafi yöntemi, parçanın geri esneme miktarı kadar kalıp yüzeylerini ters yönde aynı miktar kapatarak uygulanan bir yöntemdir. Bazı durumlarda aynı miktar yeterli olmayabilir ve daha fazla kapatmak gerekebilir. Analiz programlarından Autoform kullanılarak yapılan iterasyonlarda istenilen tolerans değerleri içine girilecek şekilde parça telafi edilir. Autoform da istenilen tolerans değeri içindeki parçanın Catia'da kullanılmak üzere TXT dosyası alınır. Kalıpta kullanılan yüzeyler bu TXT dosyası ile Catia programında tekrar düzenlenir. Burada kalıptan çıkan parçanın ölçüm taraması ile karşılaştırıp telafinin ne oranda doğru olduğu kontrol edilebilir. 90° olan dik duvarlarda telafi işlemi zordur. Çünkü geri esneyen parçalarda parçayı kapatmak için ters açıda bir yüzey verilmelidir. Ters açıdaki duvarların 5 eksenli cnc ile işlenmesi gerekmektedir ve ayrıca ters açıda kalan parçanın kalıptan çıkarılması da zor olacaktır. Bu işlem hem zaman kaybına yol açar hem de maliyet açısından fazladır. Maliyetli olmasına rağmen geri esneme probleminin çözülebilmesi için telafi etme en çok kullanılan yöntemlerdendir.

Kalınlık sacın geri esnemesinde en önemli parametrelerdendir. Sac malzemenin kalınlığı arttıkça geri esneme düşer. Akma dayanımı da geri esneme davranışında etken bir parametredir. Akma dayanımı düşük olan parçalarda geri esneme daha düşüktür (Turan, 2009). elastisite modülü arttıkça, elastik deformasyona direnç artarak geri esneme miktarı azalmaktadır (Tekiner, 2004).

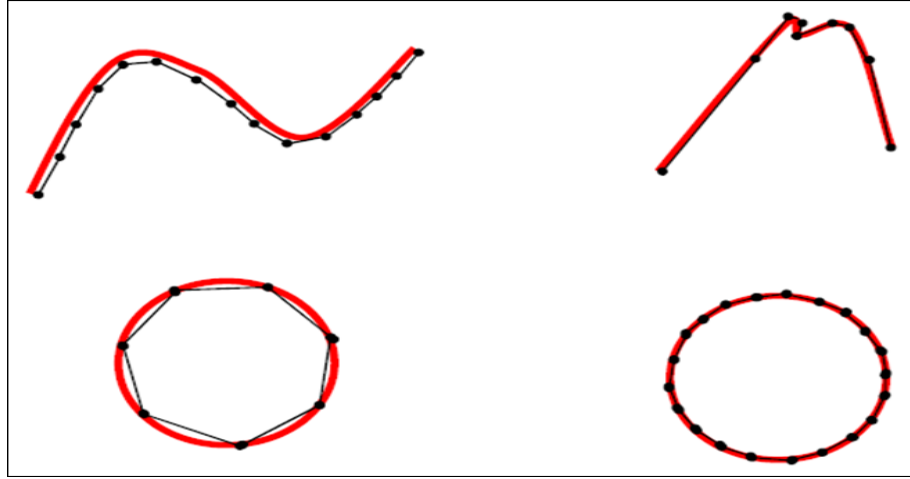
Sıcaklık ve şekillendirme hızı parametreleri de geri esneme problemini etkileyen faktörlerdir. Artan sıcaklık değerleri sac malzemelerin akma dayanımlarını düşürmektedir. Ayrıca sıcaklığın artması, şekillendirilen malzemelerin iç ve dış yüzeylerindeki çekme ve basma kalıntı gerilmeleri arasındaki farkı azaltmaktadır. Sonuç olarak, artan sıcaklık değerlerinde yapılan şekillendirme sonrasında oluşan geri esneme miktarı azalmaktadır (Kim ve Koç, 2008). Şekillendirme hızı, geri esneme miktarını belirgin bir şekilde etkilememektedir. Literatürde yapılan bir çalışmada, artan deformasyon hızına bağlı olarak geri esneme değerinin çok az miktarda azaldığı görülmüştür (Kılıç vd., 2009).

#### 4.1. Sonlu Elemanlar Metodu

Sonlu elemanlar metodu (SEM), tasarımın analiz ve test aşamalarında kullanılan bilgisayar destekli analiz uygulamalarındandır. Karmaşık yapıdaki problemlerin çözümünde kolaylıkla uygulanabilmesi ve sonuca yaklaşımdaki doğruluk açısından analiz işlemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

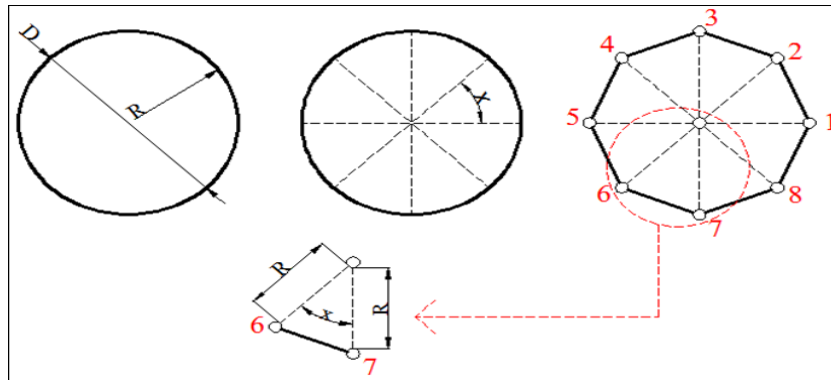
SEM; karmaşık problemlerin daha basit alt problemlere ayrılarak belirli yük ve sınır koşullarında her birinin kendi içinde çözülmesiyle analiz edilip tam sonuca yaklaşılacak bir çözüm şeklidir. Tasarımın modellenmesi, karmaşık bölgenin sonlu elemanlar olarak ifade edilen geometrik basit alt bölgelere yani elemanlar denen parçalara ayrılmasıyla yapılır. Elemanlar sonlu sayıda bilinmeyen içermektedir. Her elemanın yüklemeye olan tepkisini belirten bir denklem vardır. Bu elemanların tepkilerinin toplamı, tasarımın vereceği tepkiyi oluşturur. Her eleman içindeki tanım denklemlerinin düğüm noktalarında bulunan değerlerin elde edilmesi, problemin çözümünde yeterli olmaktadır.

SEM, fizik ve mühendislikte karşılaşılan birçok karmaşık problemin çözümünde kullanılan en yaygın ve etkin sayısal yöntemlerden biridir. Statik, dinamik, yorulma, hasar analizleri, ısı transferi analizleri, çarpışma simülasyonları, biyomekanik analizler, akış analizleri, elektromanyetik analizler, doğrusal (lineer) ve doğrusal olmayan (nonlineer) analizler bu yöntemi kullanılarak çözülebilmektedir. Metot, karmaşık yapıları daha küçük parçalara böler ve bu küçük parçaları kendi içinde çözerek komple bir çözüme ulaşmayı hedefler. Bu metot günlük yaşantıda da birçok uygulamada kullanılmaktadır. Örneğin bir eğrinin boyu ya da bir dairenin çevresini hesaplanacak olursa ilk olarak Şekil 4.3'teki eğri üzerinde, boyu hesaplanabilen düz doğrular çizip bunlar toplanmaktadır. Böylece, bu metot ile belli bir doğrulukta eğrinin boyunu hesaplamış olur. Kullanılan düz çizgilerin boyu ne kadar küçük olursa sonuç o kadar doğru olmaktadır. Ayrıca dar köşelerde düz çizginin boylarının küçültülmesi sonucu daha hassas yapacaktır (Gök vd., 2018).



Şekil 4.3. Eğrilerin küçük çizgilere bölünmesi (Gök vd., 2018).

Bunun yanı sıra, Şekil 4.4'teki dairenin alanı hesaplanarak ve analitik sonuçlarla karşılaştırıldığında şekildeki üçgenin alanı Eşitlik 4.4'deki gibi ifade edilmektedir. Tek bir üçgenin alanından tüm dairenin alanı Eşitlik 4.5'deki gibi bulunmaktadır. Tüm dairenin alanı aynı zamanda Eşitlik 4.6'daki gibi analitik formülasyon ile ifade edilmektedir. Eşitlik 4.5'deki  $N$  toplam üçgen sayısını ifade eder.  $A_i$  bir üçgenin alanı,  $A_T$  ise dairenin toplam alanıdır (Gök vd., 2018).



Şekil 4.4. Daireyi elemanlara bölmek (Gök vd., 2018).

$$A_i = \frac{1}{2} \times R^2 \times \sin x \quad (4.4)$$

$$A_T = \sum_{i=1}^N A_i = \frac{1}{2} \times R^2 \times \sin(2\pi/N) \times N \quad (4.5)$$

$$A_T = \pi \times R^2 \quad (4.6)$$

Şekildeki dairenin alanı önce 8 parçaya, sonra 48 parçaya bölerek hesaplanıp ve elde edilen numerik hesap sonucunu analitik hesap sonucuyla karşılaştırıldığında 8 parçaya bölünen daire alanının nümerik hesabı ile analitik hesabı arasında %10,8'lik bir fark bulunmuştur. Mühendislik hesaplarında %10'a kadar yapılan hesaplama hataları göz ardı edilebilir. Eleman sayısının 8'den 48'e çıkarılmasıyla hesaplamalar arası fark %0.63 değerine düşmüş ve analitik sonuca çok yakın bir sonuç elde edilmiş olur (Gök vd., 2018).

Hesaplamalar genellikle düğümler üzerinde gerçekleştirilirken, bu düğümler üzerinde denklemler oluşturulur. Problemin büyüklüğüne göre çok sayıda denklem elde edilebilir. Bu denklemlerin çözümü ancak bilgisayar yardımı ile gerçekleştirilebilir. Aslında, çözüm sonucunda bulunan değerler düğümler üzerinde bulunan değerlerdir. Bu nedenle doğru bir sonuç için iyi eleman yapısı ve ona bağlı olarak düğüm yapısı önem arz eder (Gök vd., 2018).

Sonlu elemanlar metodunu diğer nümerik yöntemlerden ayıran bazı özellikler şunlardır:

- Kullanılan sonlu elemanların boyutlarının ve şekillerinin değişkenliği nedeniyle ele alınan bir parçanın geometrisi tam olarak temsil edilebilir.
- Birden çok delik veya köşeleri olan bölgeler kolaylıkla incelenebilir.
- Farklı malzeme ve geometrik özellikleri bulunan parçalar analiz edilebilir.
- Sınır şartlarının uygulanabilirliği kolaydır.

Sonlu elemanlar metodunun bu avantajlarının yanında bazı dezavantajları da vardır. Örneğin çatlama, kırılma davranışı ve temas problemleri gibi bazı karmaşık olaylara uygulanmasında zorluklarla karşılaşmaktadır. Malzeme parametreleri gibi giriş bilgileri iyi tanımlanırsa gerçeğe yakın sonuçlar alınabilir. Yani programın verileri hatasız olmalı ve iyi kontrol edilmelidir. Sonlu elemanlar analizlerinden doğru sonuçlar alabilmek için özellikle sürekli ortamın çok sayıda elemana bölünmesi gereklidir. Bu metottan elde edilen sonuçlar dikkatli bir şekilde değerlendirilmelidir. Ayrıca bu metodun kullanılmasında, genellikle büyük bilgisayar belleğine ve zamana ihtiyaç duyulmaktadır.

Sonlu elemanlar metodunda, öncelikle bir elemana ait sistem özelliklerini içeren denklemler çıkarılır, bütün sistemi temsil edecek şekilde eleman denklemleri birleştirilir, böylece sisteme ait lineer denklem takımı elde edilir. Bu sonlu elemanlar metodunun temel prensibi olarak düşünülebilir. Bir elemana ait denklemlerin elde edilmesinde farklı yöntemler

kullanılabilir. Bu yöntemlerin içerisinde yaygın olarak kullanılan dört temel yöntem şunlardır (Kılıç, 2009):

I. Direkt yaklaşım: Bu yaklaşım genellikle tek boyutlu ve basit problemlerin çözülmesinde uygundur.

II. Varyasyonel yaklaşım: Bir fonksiyonelin maksimum ve minimum edilmesi demektir. Katı cisim mekaniğinde en çok kullanılan fonksiyoneller potansiyel enerji prensibi, komplementer (tümleyen) potansiyel enerji prensibi ve Reissner prensibi olarak sayılabilir. Fonksiyonelin birinci türevinin sıfır olduğu noktada fonksiyonu ekstremize eden değerler bulunur. İkinci türevinin sıfırdan büyük veya küçük olmasına göre bu değer maksimum veya minimum olduğu anlaşılır.

III. Ağırlıklı kalanlar yaklaşımı: Bir fonksiyonun çeşitli değerler karşılığında elde edilen yaklaşık çözümü ile gerçek çözüm arasındaki farkların bir ağırlık fonksiyonu ile çarpılarak toplamlarını minimize etme işlemine denir. Bu yaklaşım kullanılarak eleman özelliklerinin elde edilmesinin avantajı, fonksiyonellerin elde edilemediği problemlerde uygulanabilir olmasıdır.

IV. Enerji dengesi yaklaşımı: Bir sisteme giren ve çıkan termal veya mekanik enerjilerin eşitliği ilkesine dayanır. Bu yaklaşım bir fonksiyonele ihtiyaç göstermez.

Sac şekillendirme işleminin sonlu elemanlar metodu ile simülasyonunu yapmak için birkaç farklı yöntem kullanılmaktadır. Bunlar rijit plastik-elastik plastik yöntem, statik kapalı yöntem, statik açık yöntem ve dinamik açık yöntem olarak sınıflandırılır.

Malzemenin rijit plastik olduğunu kabul etmek sonlu elemanlar hesaplamalarını kolaylaştırdığı için hızlı bir hesaplama sağlar. Bu kabul ile birlikte malzemenin elastikliği göz ardı edilir. Bu göz ardı etme şekil verme sonucu geri esnemeyi ve dişi veya pot üzerinde sac malzemenin hareketinin belirlenememesine yol açar. Elastik plastik yöntemde daha karmaşık formülasyon kullanıldığı için hesaplama süresi artar fakat daha doğru sonuçlar elde edilir (Arslan, 2007).

Statik kapalı yöntem, quasi-statik denklemlerle sonlu elemanlar formülasyonunu oluşturur. Bu yöntem ile yapılan hesaplamalar karşıt dinamik etkilerin hesaplanmasını içermez. Bununla beraber, bu yöntemde katılık matrisi diagonal değildir ve bu durum, iteratif olarak çözümlenmeyi gerektirir. Ancak bu çözümlenmede, sac ile takım arasında sürekli yenilenen temas koşullarından dolayı bazen iterasyonlarının çözümü mümkün olmaz. Özellikle sac şekillendikçe aldığı karmaşık formların ifadesi temas koşullarını oldukça karışık hale getirdiğinden simülasyon tamamlanamaz (Arslan, 2007).

Statik açık yöntemde ise kapalı yöntemde çözülemeyen iterasyonlar sorununu ortadan kaldırmak için iterasyon gerektirmeden çözülebilecek bir teğet rijitlik matrisi oluşmasını sağlayacak bir zaman adımı tanımlar. Bu sayede çözüm hesapları daha az hatalı olacakken hesaplama zamanı bir miktar artacaktır (Arslan, 2007).

Dinamik açık yöntem, dinamik eşitlik denklemini her düğüm noktası için ve bütün zaman adımlarında çözümlenmektedir. Bu metodunun en önemli faydası, rijitlik matrisi oluşturulmadan her adımda doğru çözümün mümkün olabilmesidir. Ancak bunun yanında, zaman artımında dinamik kararlı bir çözüm elde etmek için, zaman adımının, girişim dalgasının hiçbir elemanı geçmemesi için kritik bir değerle sınırlandırılması gerekir. Bu genelde zaman adımının 10E-6 saniye gibi bir değere eşitlenmesi demektir. Hesaplama zamanının azaltılması için simülasyonda arttırılmış takım hızları girilir fakat buda gerçekçi olmayan şekillendirme modellerine yol açar (Arslan, 2007).

Sonlu elemanlar analizleri yapmak için artan teknolojik gelişmeler ile birlikte birçok sonlu eleman yazılımları geliştirilmiştir. Çalışmada kullanılan Autoform yazılım programı İsviçre kökenli bir yazılım olup, statik implisit yöntemle çalışır. Kullanımı kolay, hassasiyeti yüksek ve çok hızlı sonuç veren bir sac şekillendirme simülasyonu ve çevre yüzeyleri geliştirme yazılımıdır. One step ve incremental hesaplamalar yapabilir. Kabuk eleman kullanıldığı için iki boyutlu mesh yapısı kullanılır. Bu yazılımda CAD programına ihtiyaç duymadan die - design modülü ile yardımcı çekme yüzeyleri meydana getirilebilir. Ayrıca bu yüzeyler iges çıktı olarak alınabilir (Uslu, 2014).

Sac malzeme endüstrisinde, sonlu elemanlar metoduyla yapılan simülasyon işlemi, çok gerçekçi avantajlar sunmaktadır. Bunları şu şekilde sıralamak mümkündür (Uslu, 2014):

- Önemli ölçüde tasarım ve geliştirme işlemlerinde sürelerin kısaltılması,
- Geliştirme işlemlerinde kullanılan malzeme miktarındaki azalma,
- Tasarım esnasında geçiş zaman aralarının azaltılması,
- En önemlisi olan ürün kalitesindeki artıştır.

## 5. MATERYAL VE METOT

Bu çalışmada, farklı kalitedeki sac malzemelerin sıvama işlemiyle şekillendirilmesinde meydana gelen geri esneme davranışı deneysel ve sayısal olarak araştırılmıştır. Deneylerde, malzeme kalitesi, malzeme kalınlığı, kalıp açıklığı, dişi kalıp erkek yarıçapı değişken olarak alınmıştır. Deneylerde kullanılan değişken işlem parametreleri Çizelge 5.1'de verilmiş olup, bu parametreler ışığında deney tasarımı ( $3 \times 3 \times 4 \times 5 = 180$ ) yapılmış ve Şekil 5.1'de parametre mantığı gösterilmiştir.

**Çizelge 5.1.** Şekillendirme işleminde kullanılan işlem parametreleri.

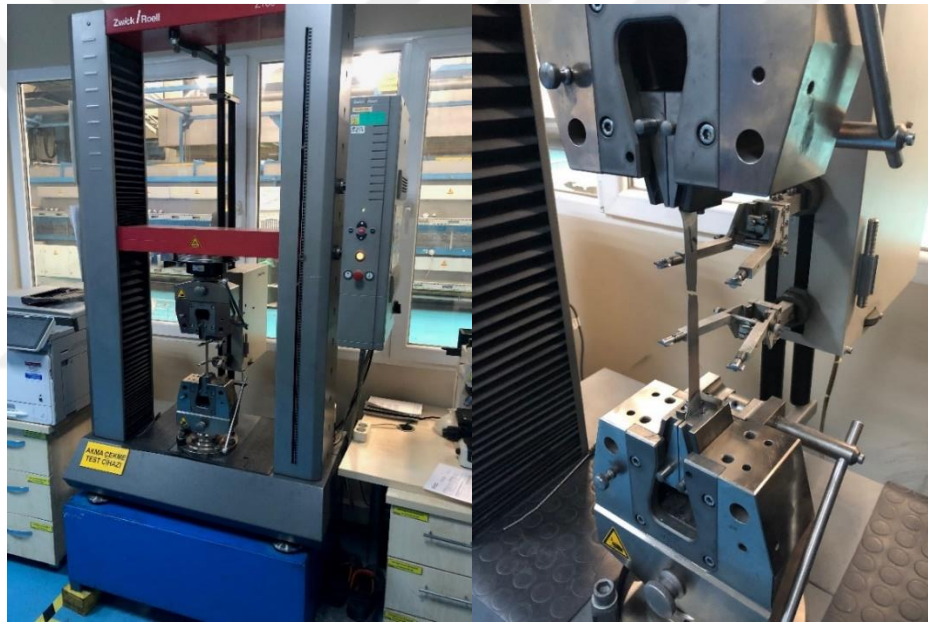
İşlem parametreleri	Değerleri
Kalıp açıklığı (°)	5, 10, 15
Kalınlık (mm)	1,2, 1,6, 2
Malzeme	DP450, DP600, DP800, DP1000
Dişi kalıp erkek yarıçapı (mm)	R6, R8, R10, R12, R14

Ölçüm No	Açı	Kalınlık	Malzeme	Radyus
1	5	1,2	DP450	6
2				8
3				10
4				12
5				14
6			DP600	6
7				8
8				10
9				12
10				14
11			DP800	6
12				8
13				10
14				12
15				14
16			DP1000	6
17				8
18				10
19				12
20				14

**Şekil 5.1.** Şekillendirmede kullanılan deney tasarımı parametreleri.



Deneysel çalışmalarda; DP450, DP600, DP800 ve DP1000 çelik sac malzemeleri kullanılmıştır. DP çelik sac kaliteleri, yüksek mukavemet ve üstün şekillendirilebilirlik özellikleri sayesinde, otomotiv endüstrisinin vazgeçilmez çelik sac malzemeleri haline gelmiştir. Bu saclar genellikle dayanımı sert saclar olarak tanımlanır. SEA'de kullanılmak üzere çelik sac malzemelere ait mekanik özelliklerin belirlenmesi için laboratuvar ortamında çekme testleri yapılmıştır. Çekme testleri, Beyçelik Gestamp Teknoloji ve Kalıp Merkezi laboratuvarında, Şekil 5.2'de gösterilen 100 kN kapasiteli Zwick Z100 marka çekme testi cihazında 10 mm/dk çekme hızında gerçekleştirilmiştir. Deneysel olarak kullanılan numuneler çekme testine ASTM-E8 standardına göre hazırlanıp teste tabi tutulmuştur (Şekil 5.3).



Şekil 5.2. Zwick Z100 akma çekme test cihazı.



Şekil 5.3. Test numunesi.

Yapılan çekme testleri sonucunda çelik sac malzemelerin belirlenen mekanik özellikleri Çizelge 5.2'te verilmiştir. Birden fazla deney yapılarak minimum ve maksimum değerler gösterilmiştir. Sac metal malzemelerin kimyasal içerikleri için teknik destek sağlayan firmalardan alınan katalog bilgileri Çizelge 5.3'e yer almaktadır.

**Çizelge 5.2.** Kullanılan sac malzemelerin mekanik özellikleri.

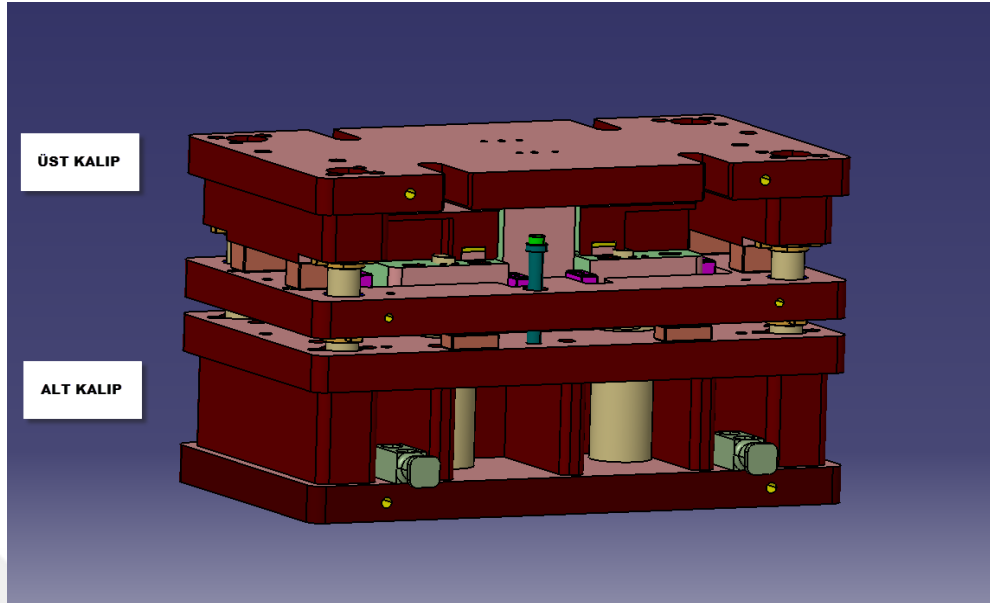
Malzeme	Çekme Gerilmesi (MPa)	Akma Gerilmesi (MPa)	Uzama (%)
DP450	450-530	260-330	27
DP600	600-700	340-410	21
DP800	780-900	460-560	15
DP1000	980-1100	680-780	10

**Çizelge 5.3.** Sac metal malzemelerin kimyasal içerikleri.

Malzeme	C Max.	Mn Max.	P Max.	S Max.	Si Max.
DP450	0,08	1,6	0,02	0,003	0,08
DP600	0,1	2	0,03	0,003	0,2
DP800	0,12	2,6	0,03	0,003	0,6
DP1000	0,1	2,4	0,03	0,003	0,5

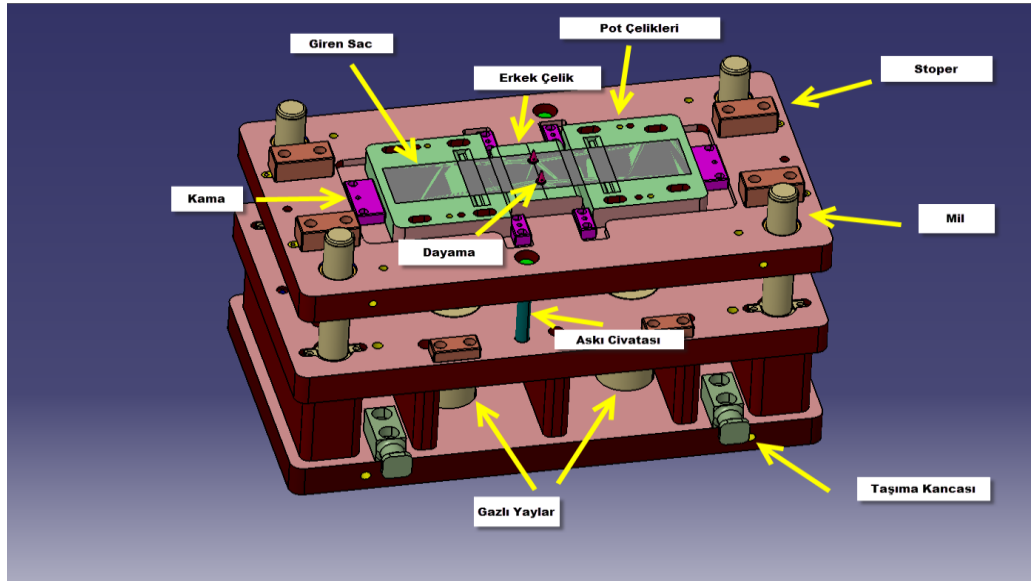
## 5.1. Deneysel Çalışma

Deneysel çalışmalarda, sıvama şekillendirme yöntemi kullanılarak farklı parametredeki sacların şekillendirilmesinin deneyleri yapılmıştır. Sıvama kalıbının tasarımı CAD programı olan Catia V5 kullanılarak yapılmıştır. Tasarımı yapılan kalıbın detay resimleri Şekil 5.4, 5.5, ve 5.6'da gösterilmiştir. Deneme yapılacak sac ölçüleri 100 x 500 mm'dir. Rulolar halinde temin edilen saclar lazer kesim atölyesinde istenilen numune boyutunda kesilmiştir. Tasarımı yapılan kalıp dişi-erkek ve pottan oluşmaktadır. Pot, altındaki gazlı yaylar sayesinde hareketli bir mekanizmadır. Dişi kalıp ile pot çemberi arasında kalan sac presin kapanması ile şekillenmeye başlayacaktır. Kalıp yapımında standart ve imalat malzemeler kullanılmıştır. Toplamda 180 parça basımı yapılacağından kalıba giren tüm sacların aynı konumda basılabilmesi için sacın ortasına iki referans deliği açılmış ve sac bu deliklerden referanslanmıştır.

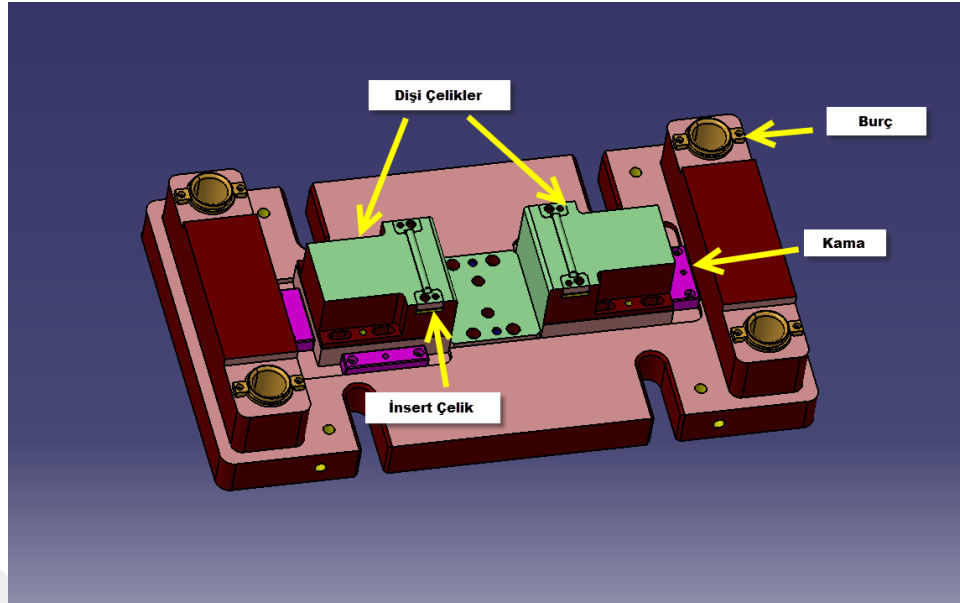


Şekil 5.4. Sıvama kalıbının genel görünümü.

Tasarımı yapılan kalıp, saclar ve tüm malzemelerin temini Beyçelik Gestamp tarafından sağlanmıştır. Tüm saclar Beyçelik Gestamp'ın alıştırma presi olan MTP401 nolu preste basılmıştır.



Şekil 5.5. Sıvama kalıbının alt kalıp görünümü ve kullanılan malzemeler.



**Şekil 5.6.** Sivama kalıbının üst kalıp görünümü ve kullanılan malzemeler.

Çalışmada kullanılan kalıp elemanlarının kullanım amaçları kısaca şöyle özetlenebilir:

- Dişi çelikler, sacı tutmaya ve şekillendirmeye yarayan elemanlardır.
- Erkek çelik, sacı şekillendirmeye yarayan elemandır.
- Pot çelikleri, sacı tutmaya yarayan elemanlardır. Sacı, şekil almaya başlamadan önce, üst kalıba bastırarak kenarlarından gerdirmeye yarar. Gazlı yaylar kuvvet kaynağını oluşturur, millerle merkezlenir. Hareketini sınırlamak için sınırlayıcı elemanlar kullanılır.

Bunlar ana elemanlar olup yardımcı elemanlar ise şöyledir:

- Gazlı yaylar, pot çemberinin kuvvet kaynağını oluşturur. Gazlı yay miktarı, ihtiyaç duyulan kuvvet, toplam kalıp ömrü ve kalıbın yay için ayrılacak yerine bağlı olarak boyutu ve miktarı seçilir. Standart olarak temin edilip çeşitleri mevcuttur.
- Sınırlayıcılar (sınırlayıcı tırnak, askı civatası vb.), potun stroğunu sınırlarlar. Aynı zamanda emniyet parçalarıdır.
- Stoper, baskı anında pot çemberi ile dişi taban arasındaki sac boşluğunun kontrol altında olabilmesi için kullanılan yardımcı malzemelerdir. Sivamanın türüne göre pot çemberi veya dişi göbek üzerinde sac alanı dışında fakat açınım sacından da uzaklaşmadan konumlandırılmalıdır. Sacın yırtması, incilmesi ve kırışıklık gibi problemlerin ayarlanması için de kullanılmaktadır.

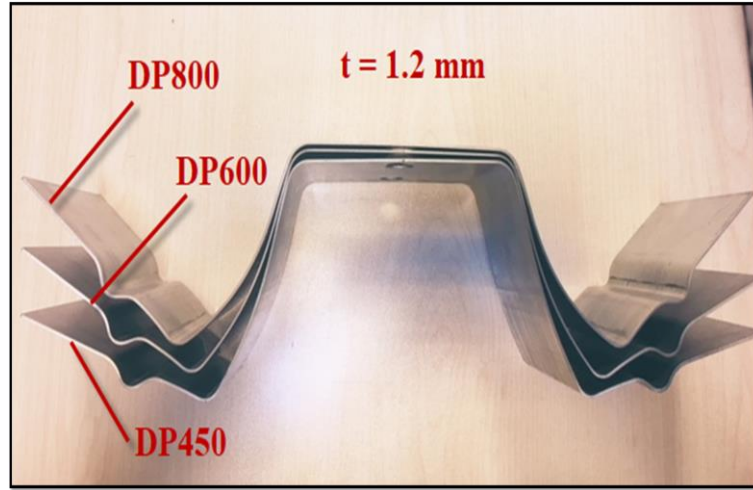
- Dayamalar, sacın kalıp üzerinde devamlı aynı konumda sabitlenmesini sağlar. Sıvama kalıplarında mekanik ve sensörlü olmak üzere iki tür dayama kullanılır. Sacın geometrisine göre uygun yerlere konumlandırılmalıdır. Sıvama kalıplarında iki adet sensörlü dayama kullanılmalıdır. Sacın kısa ve uzun kenarında birer adet kullanılmaktadır.
- Mil-burç, Alt - üst tabla arasındaki merkezlemeleri yapmak için kullanılmaktadır.
- Taşıma kancaları, kalıbın daha rahat taşınması için yapılan malzemelerdir.
- Kama, çeliğe destek verir. Bu kalıp tasarımında kullanılan birçok kama vardır. Bunlar kalıbın açıklığına göre (5°, 10°, 15°) çelikler kaydırıldığından sürekli değişmektedir. İntert çelik, o bölgedeki çeliğin sökölüp takılmasını kolaylaştırır. Kullanılan malzemelere ait teknik resim detayları EK 1-9 arası verilmiştir.



Şekil 5.7. Sıvama kalıbının montaj sonrası görüntüsü.



Şekil 5.8. MTP401 nolu 600 Tonluk pres ve kalıbın görüntüsü.

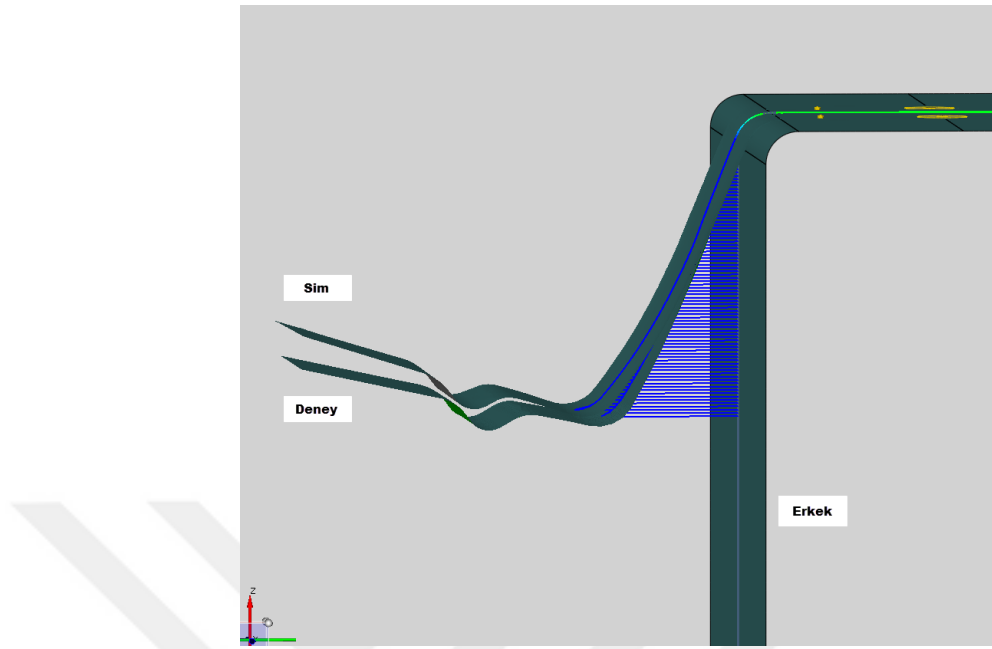


Şekil 5.9. Kalıptan çıkan parçaların bazıları.

Parçalar kalıptan çıktıktan sonra kullanılan parametrelere bağlı olarak geri esnemiş haldedirler. Geri esnemiş parçalar Atos ölçüm cihazı kullanılarak taranmıştır. Taranan parçalar ve simülasyondan alınan STL (Standard Triangle Language) datalar yine Atos viewer programında karşılaştırılarak simülasyon ve deney sonuçlarının benzerliğine bakılmıştır. Ayrıca karşılaştırılan parçaların geri esneme miktarına ölçebilmek için kalıpta kullanılan erkek duvarından yararlanılmıştır. Erkek duvarıyla geri esneyen parçaların yarıçap dibinden ölçümü sağlanarak geri esneme miktarları belirlenmiştir (Şekil 5.11).



Şekil 5.10. Atos ölçüm cihazı.

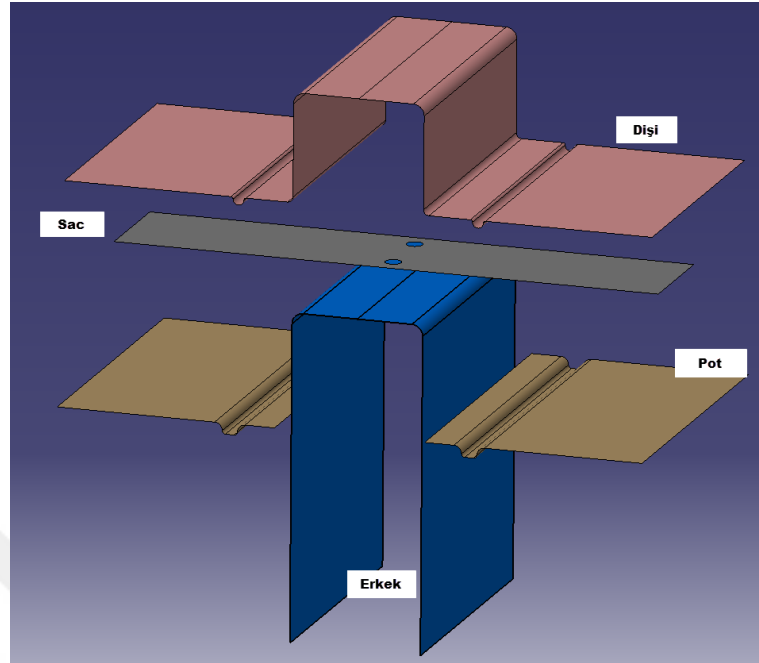


**Şekil 5.11.** Atos viewer programında simülasyon ve deney sonuçlarının karşılaştırılması.

## 5.2. Sayısal Çalışma

Sac malzemede şekillendirme sonrası oluşan geri esneme davranışları Autoform R8 programı kullanılarak analiz edilmiştir. Birçok firma tarafından tercih edilen Autoform programı sac metal şekillendirme ve kalıp endüstrisine özel olarak geliştirilen yüksek doğruluklu ve güvenilir sonuçlar veren verimli bir yazılım çözümdür. Autoform programının kullanımı ile sac metal parça proseslerinde güvenilirlik artar, maliyetler düşer, deneme ve devreye alma zamanları kısalmıştır (URL-4). Autoform yazılımı ile sac metal şekillendirme yöntemlerinin tümü analiz edilebilmektedir. Bu yazılım sac parçaların üretilebilirliğini inceler. Parçaların atölye ortamındaki durumunun birebir simule edilmiş halidir. Yazılım ortamında parçada görünen hasar, fiziksel ortamda ortaya çıkmaktadır. Bu sebeple şekillendirme sırasında oluşabilecek her türlü hasar fizibilite aşamasında görülüp gerekli düzeltmeler yapılır.

Kalıp yüzeylerini ister Catia ortamında ister Autoform'un bir modülü olan Die Designer kısmında yapabiliriz. Sıvama işlemi için gerekli kalıp yüzey modelleri Şekil 5.12'de verilmiştir.

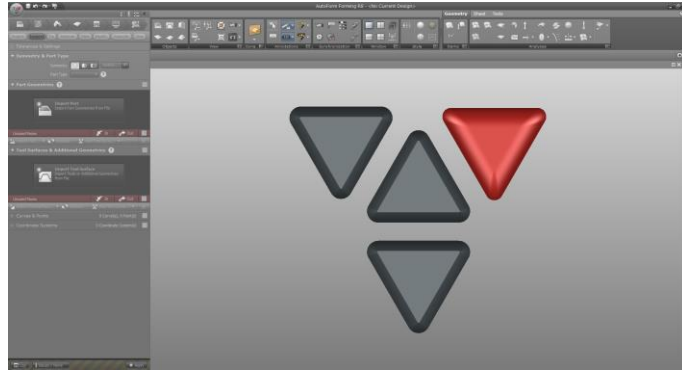


**Şekil 5.12.** Kalıp elemanlarının ve sac malzemenin pozisyonu.

Sıvama analizinin yapıldığı Autoform programının ara yüzü Şekil 5.13'de verilmiştir. Analizler, Autoform'un artımlı çözüm yapan Incremental Solver modülünde yapılmıştır. Proses optimizasyonu için hassas hesaplamalar bu modülde yapılır. Catia V5 programında hazırlanan kalıp yüzey modelleri Autoform programına New file penceresinden aktarılır. Aktarılan yüzeylerde sacın kalınlık yönünü belirten parlak veya mat yönler aynı yöne bakacak şekilde düzeltilir. Tolerans ve ayarlar kısmında standart kullanılan Autoform şablonu kullanılmıştır. Kalıp yüzeylerini tanıttıktan sonra kalıp eksenini ayarlanır. Kalıp yüzeyleri ters açıda kalmayacak şekilde bir kalıp eksenini atılır. Eksene dik bakıldığında tüm yüzeylerin görülmesi gerekmektedir. Ters açıda gelme durumu o bölgedeki çeliğin işlenmesini zorlaştıracak ve kalıptan parça çıkarken ters gelen bölgeye çarpacağı için ekstra ters gelen bölgenin boşaltılması gerektiğinden istenmeyen bir durumdur. Zaman ve maliyet kaybına yol açar. Eksen atıldıktan sonra malzeme tanımlama kısmına geçilir. Autoform'un malzeme kataloğu çok geniştir. Çekme testine tabi tutulan sacların akma çekme değerleri göz önünde bulundurularak kütüphaneden o karşılıklı DP malzemeler seçilmiştir.

Sonrasında operasyonların tanımlandığı sekmeye geçilir. Burada şekillendirme operasyonları tanımlandığı gibi her operasyon sonuna o operasyondaki geri esnemeyi görmek için ölçüm operasyonu eklenebilir.

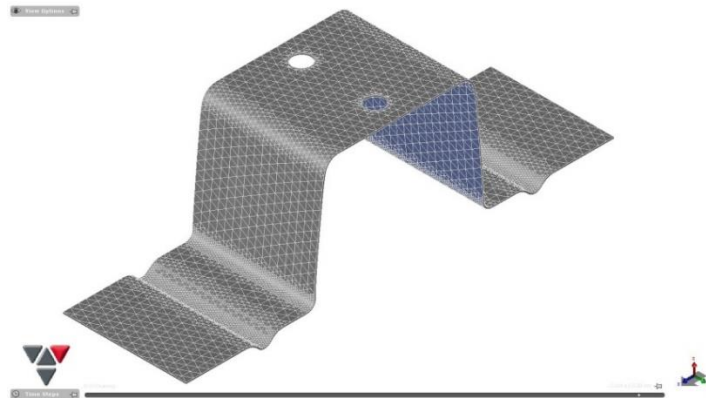




**Şekil 5.13.** Autoform R8 programının ara yüzü.

Autoform'da operasyonlar belirlendikten sonra bir diğer sekme olan Tools sekmesine geçilir. Burada tanımlanan operasyonlara ilgili yüzeyler çağırılır. Bu çalışmada sıvama operasyonu ve bir ölçüm operasyonu tanımlanmıştır. Sıvama operasyonu için dişi, erkek ve pot yüzeyleri çağırıldıktan sonra geometrilerin çalışma yönü, pozisyonu ve etki edeceği kuvvetler girilir. Bunların yanlış girilmesi sonucu simülasyon hata verecek ve tamamlanamayacaktır. Bu kısımda ayrıca kalıpların yağlama derecesi de belirlenir. Standart olarak çelik malzemelerde yağlama oranı 0,15'tir.

Autoform'da kullanılan mesh sayıları parçanın doğruluğu açısından önemlidir. Mesh sayısı arttıkça çözüm daha doğru olmaktadır. Çalışmada kullanılan mesh sayısı 1147'dir. Üçgen meshler atılarak geometri 1147 parçaya bölünmüştür. Parça boyutuna bakıldığında bu mesh sayısı yeterlidir. Mesh görüntüsü Şekil 5.14'te gösterilmektedir.

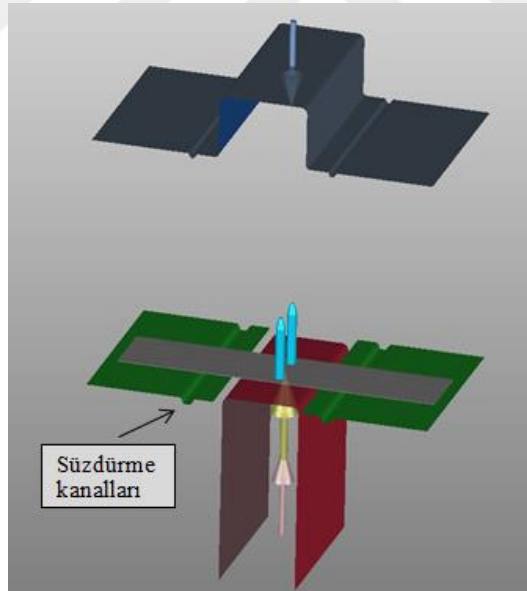


**Şekil 5.14.** Parça üzerindeki mesh görüntüsü.

Autoform'da tüm tanımlamaları yaptıktan sonra Control kısmında simülasyon sonucundan beklenen veriler işaretlenir. Bu kısım ile simülasyonun kalitesini ayarlama ve simülasyon sonuçlarının incelenmesinde kullanılacak parametrelerin (Şekil 5.15) seçilmesi işlemleri yapılır.

Kalıp elemanları	Malzeme Özellikleri	Proses Parametreleri
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dişi</li> <li>• Erkek</li> <li>• Pot</li> <li>• Süzdürme kanalları</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gerilme-gerinim eğrisi</li> <li>• Anizotropi</li> <li>• Şekillendirme sınır diyagramı</li> <li>• Pekleşme üsteli</li> <li>• Akma gerilmesi</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Proses adımları</li> <li>• Açınım</li> <li>• Baskı plakası kuvveti, şekli</li> <li>• Süzdürme kanalları</li> </ul>
<b>SONUÇLAR</b> Gerilme dağılımı, inceleme, kırışma, pres kuvveti, hareketli kuvveti, şekillendirilebilirlik, geri esneme		

Şekil 5.15. Autoform R8 yazılımının girdileri ve çıktıları.

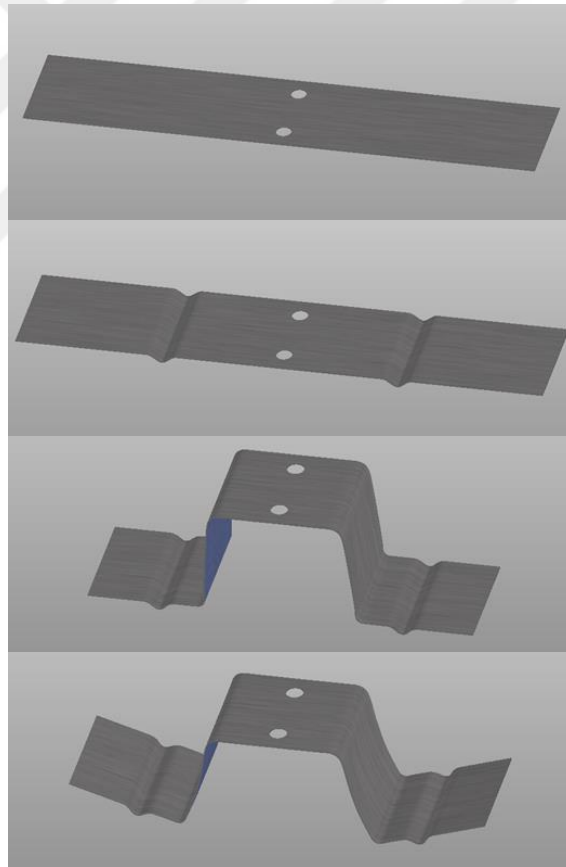


Şekil 5.16. Autoform R8 de tanıtılan operasyon yüzeyleri.

Simülasyonda tanımlanan yüzeylerden pot yüzeyinde süzdürme kanalları bulunmaktadır. Bu kanallar sac parçayı gerdirmek için eklenmiştir. Kalıp tasarımında potun karşısına gelen kısma insert çelik konulmuştur. Potun üzerinde bulunan süzdürme kanalları sabittir. İntert çelik, değişen parametrelerle birlikte sacı daha az veya daha fazla gerdirmek için ayarlanabilir yapılmıştır. Ayarlanması için insert çeliğin altına shim plakalar

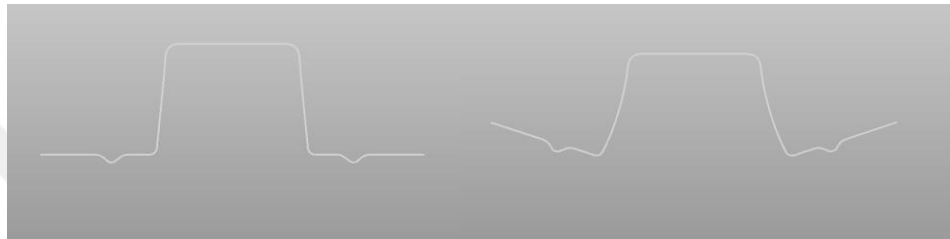
konulmuştur. Simulasyonda yapılan denemelerde parçanın yan duvarındaki maximum failure çıktısı limit değeri firma standardı olan 0,8 olarak belirlenmiş, bu değerin üzeri parçanın yırtılmasına yol açacağı için limiti sağlayacak insert yükseklikleri belirlenmiştir. Kalıpta parça basımında her parça için farklı yükseklik değeri olduğundan o bölgedeki çelik sökölüp takılarak ayarlanmış, böylece parçalar yırtmadan ve pres başında zaman kaybı olmadan alınmıştır.

Şekil 5.17’de gösterilen sıvama işleminin simülasyon aşamalarıdır. İlk resimde alt ve üst kalıp açık haldedir. Sac, pot çeliklerinin üzerinde durmaktadır. Daha sonra dişi kalıp, pres kuvvetinin etkisiyle kapanmaya başlar ve pot çemberi ile öpüşür. Sac, emniyetli bir şekilde erkek kalıbın üzerine sıvanmaya başlar. Şekillenme, yüzeyler arasında sac kalınlığı kadar mesafe kalıncaya dek sürer. Şekli alan parça, potun yukarı hareketiyle erkek göbekten ayrılır ve simülasyon tamamlanmış olur.

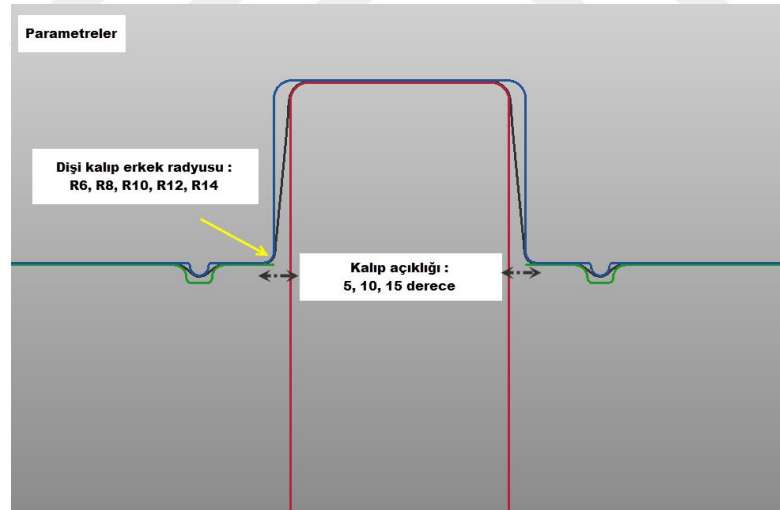


**Şekil 5.17.** Sıvama işleminin operasyon aşamaları.

Simülasyondan çıkan sacın olması gereken durum ve geri esnemiş hali Şekil 5.18’de gösterilmektedir. Çalışmada kullanılan kalınlık ve sac malzemesi dışındaki kalıp açıklığı ve dişi kalıp erkek yarıçapı değişkenleri Şekil 5.19’da gösterilmiştir. Kalıp açıklığı, dişi ve erkek arasındaki boşlukta sacın yaptığı derece hesaplanarak kalıp tasarlanmıştır. Kalıpta kullanılan kamalar sayesinde her bir açıklık için dişi ve pot çeliklerinin arkasındaki kamalar değiştirilerek açıklık ayarlanabilir hale getirilmiştir. Değişken olan yarıçap için en küçük yarıçapla çalışmalara başlanmış, yarıçap büyütülecek çelikler tekrar işlenerek diğer yarıçap değerleri elde edilmiştir.



Şekil 5.18. Simülasyondan çıkan parçanın geri esnemenin önceki ve sonraki hali.

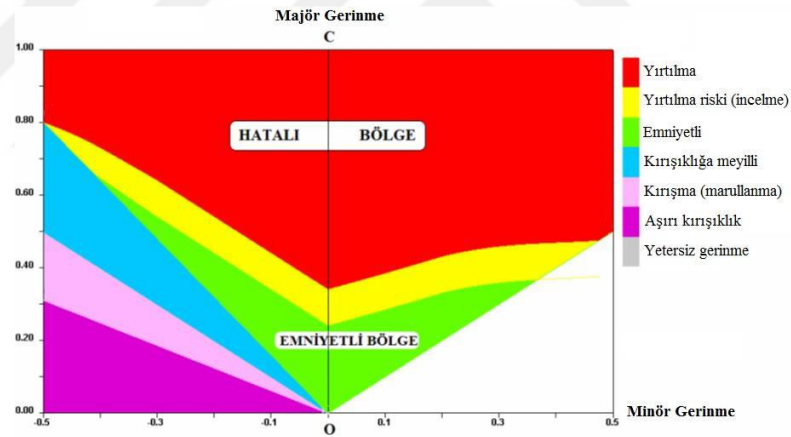


Şekil 5.19. Çalışmada kullanılan diğer parametrelerin gösterimi.

Simülasyon sonuçlarında birçok çıktı elde edilebilmektedir. Gerilme dağılımı, şekillendirilebilirlik, kırışma, incelleme, geri esneme, operasyonel kuvvet ihtiyaçları bunlardan bazılarıdır. Bu çıktılardan birisi olan Şekillendirme Sınır Diyagramı (Forming Limit Diagram, FLD), şekil alan parçanın tüm adımlardaki şekillendirilebilme limitlerini gösteren bir grafikdir. Grafikte majör ve minör gerilmelerin birim şekil değiştirme yüzdeleri yer alır. Tanımlanan her

malzeme için uzama değişim sınırı farklıdır. Simülasyon başladığında sac parça gerilmelere maruz kalır. Bu gerilmelerin adım adım simülasyon boyunca değişimini FLD diyagramında görmek mümkündür. Grafiği okuyarak sac malzemelerin şekillendirilebilirliği ve bu sırada oluşabilecek yırtılma, kırışma, incelmeye gibi sonuçları görülebilmektedir.

Şekil 5.20’de gösterilen diyagrama Autoform yazılımından ulaşılabilir. Burada renkli alanlardan her biri farklı bir durumu ifade etmektedir. Kırmızı ile gösterilen bölge diyagramın üst limit çizgisidir. Bu çizgi aşıldığında parçada yırtıklar oluşacaktır. Sarı renkli bölgede, parça yırtılmaya çok yakındır ve risklidir. Parçada incelmeler olabilmektedir. Yeşil renkli bölgede, sac parçada istenilen gerilme sağlanmış olup ve sac emniyetli bölgededir. Kırışıklığın başladığı alan mavi renk ile gösterilmiştir. Pembe renkli bölgede, parçada marullanma şeklinde kırışmalar oluşacaktır. Mor renkli bölgede ise, parça tamamen kırışmış hatta sac üst üste binmiş bile olabilmektedir. Gri bölgede de parçanın yeteri kadar gerilemediği görülmektedir (Kahraman, 2008).



Şekil 5.20. Şekillendirme Sınır Diyagramının genel açıklaması (Kahraman, 2008).

Kalıpta kullanılacak gazlı yaylar için gerekli kuvvet, toplam presin kuvveti gibi değerler de Autoform’ dan okunabilmektedir.

Kalıp proses ve tasarımının genel işleyişi ile ilgili görsel EK-14’de gösterilmektedir.

## 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Malzeme kalınlığı, malzeme kalitesi, kalıp açıklığı ve dişi kalıp erkek yarıçap parametrelerine bağlı olarak toplamda 180 adet parçanın sıvama işlemiyle şekillendirilmesinden meydana gelen geri esneme davranışı deneysel ve sayısal olarak araştırılmıştır.

Kullanılan parametreler ışığında sayısal ve deneysel parçaların ölçümleri arasındaki farklar bulunmuştur. Pres altında basılan deney ürünü olan parça ile simülasyon çıktısı olan parça Atos ölçüm programında karşılaştırılıp ölçümler mm cinsinden yapılmıştır. Ölçümde parçadaki erkek yarıçap başlangıç noktası ile erkek kalıp duvarı arasındaki mesafe esas alınmıştır. Şekil 5.11’de görüleceği gibi erkek kalıp duvarıyla taranan parçalar arasına çizgiler atılıp ölçümler hep aynı noktadan alınmaya çalışılmıştır.



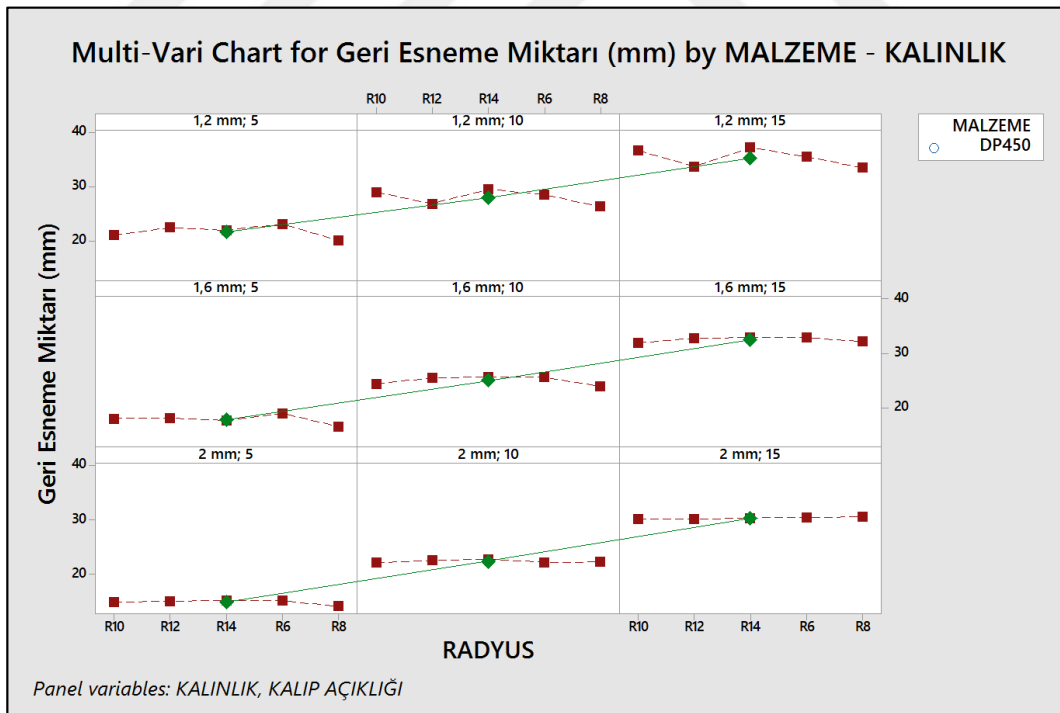
Şekil 6.1. Şekillendirilmiş deney numunelerinin bazıları.

DP450 kalitesindeki sac malzemelerin geri esneme sonuçları EK-10 ve Şekil 6.2’de verilmiştir. Minitab programı kullanılarak elde edilen Çoklu Değişken Grafiği (Multi-Vari Chart) incelendiğinde; kalıp açıklığı arttıkça geri esneme değerlerinde artış görülmüştür. Ayrıca sac kalınlığı arttıkça geri esneme miktarı azalmıştır. DP450 kalitesindeki sac malzemeler için

1,2 mm ve 1,6 mm sac kalınlıklarında en ideal dişi kalıp erkek yarıçap değeri R8'dir. DP450 kalitesindeki sac malzemesi için 2 mm sac kalınlığında en ideal dişi kalıp erkek yarıçap değerleri R6 ve R8'dir.

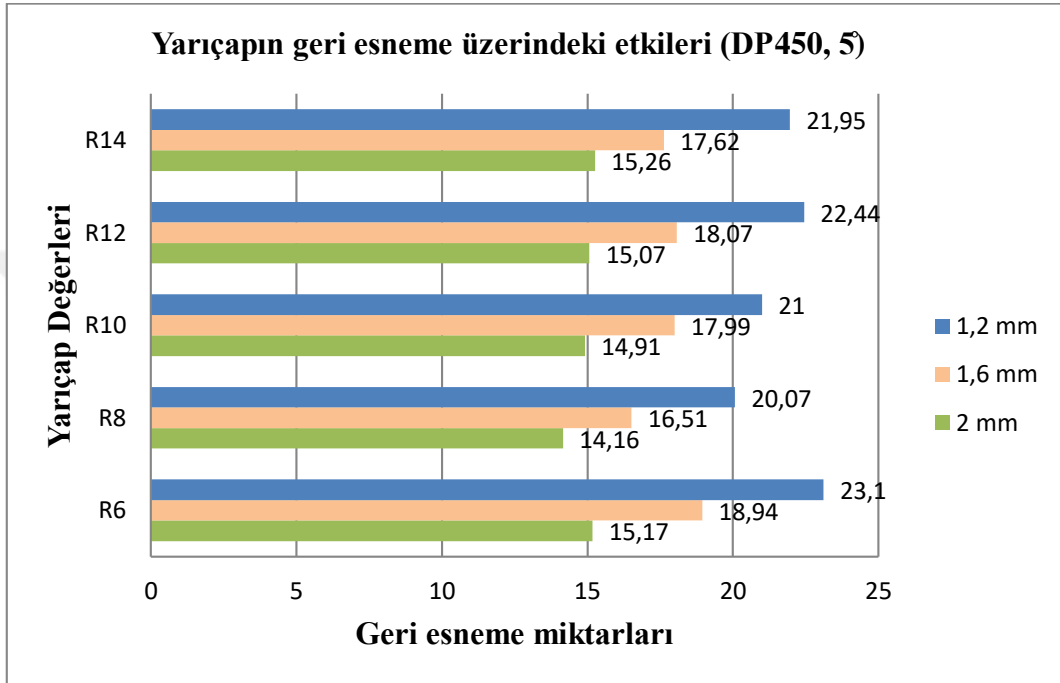
Geri esneme sonuçlarında yarıçap değerlerine bakılacak olursa en tutarlı olan DP450 kalitedeki sac malzeme için 15 derece kalıp açıklığında, 2 mm sac kalınlığındadır. Neredeyse tüm yarıçaplar yakın değerlerde çıkmıştır. Geri esneme sonuçlarında yarıçap değerlerinde ise en fazla sapma olan DP450 kalitedeki sac malzeme için 15 derece kalıp açıklığında, 1,2 mm sac kalınlığındadır.

EK-10 incelendiğinde ise geri esneme sayısal ve deneysel sonuçlarının çoğu parametre için birbirine yakın çıktığı görülmektedir. Bazı durumlarda sayısal tahminler deney sonuçlarından fazla çıkmıştır. DP450 kalitesindeki sac malzemenin, kalıp yarıçapı R8, 5 derece kalıp açıklığında ve 2 mm sac kalınlığında en az geri esneme değerini verdiği, kalıp yarıçapı R14, 15 derece kalıp açıklığı ve 1,2 mm sac kalınlığında ise en fazla geri esneme değerini verdiği görülmüştür.



Şekil 6.2. DP450 kalitesindeki sacların sayısal geri esneme değerleri ve parametrelerin etkileri.

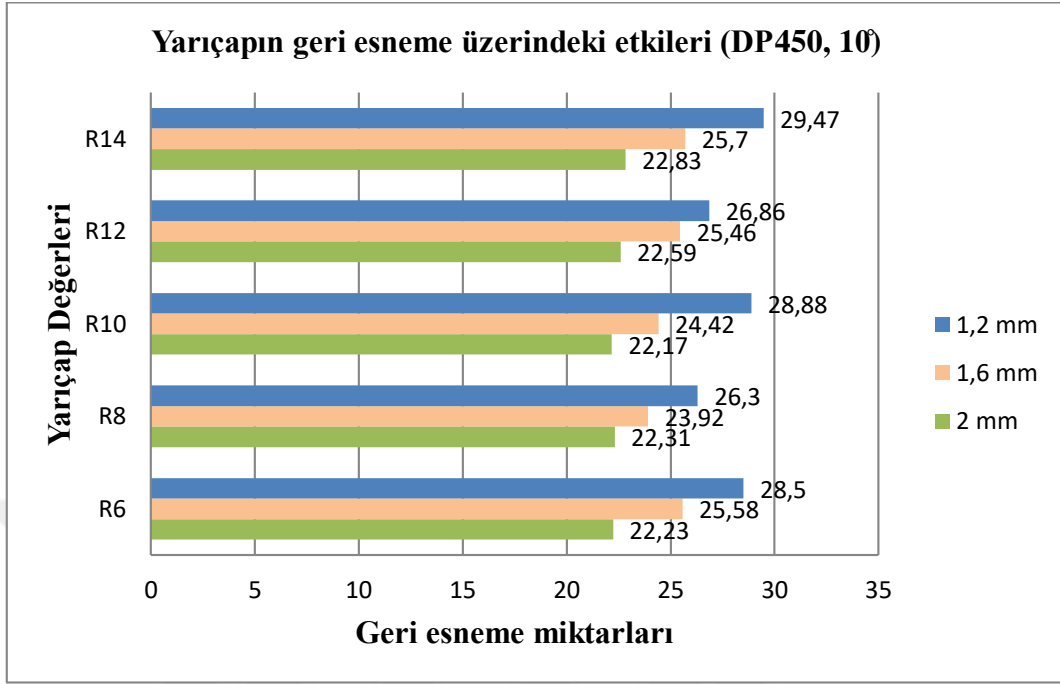
Şekil 6.3'te 5 derece kalıp açıklığında DP450 kalitesindeki saclarda yarıçap değerinin geri esneme üzerindeki etkileri gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde en az geri esneme miktarının R8 ve 2 mm kalınlığında olduğu görülmüştür. Bu değer 14,16 mm'dir. En fazla geri esneme ise R6 ve 1,2 mm kalınlığında görülmüştür. Bu değer 23,1 mm'dir.



**Şekil 6.3.** 5 derece kalıp açıklığında DP450 kalitesindeki saclarda yarıçapın geri esneme değerlerine etkisi.

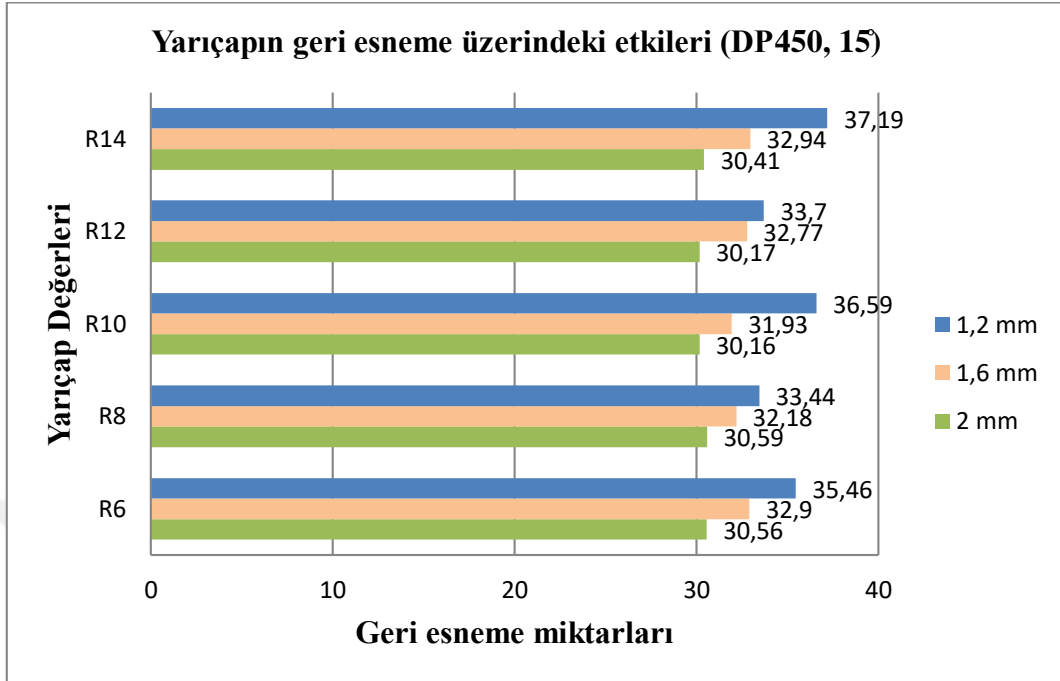
Şekil 6.4'te 10 derece kalıp açıklığında DP450 kalitesindeki saclarda yarıçap değerinin geri esneme üzerindeki etkileri gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde en az geri esneme miktarının R10 ve 2 mm kalınlığında olduğu görülmüştür. Bu değer 22,17 mm'dir. En fazla geri esneme ise R14 ve 1,2 mm kalınlığında görülmüştür. Bu değer 29,47 mm'dir.





**Şekil 6.4.** 10 derece kalıp açıklığında DP450 kalitesindeki saclarda yarıçapın geri esneme değerlerine etkisi.

Şekil 6.5'te 15 derece kalıp açıklığında DP450 kalitesindeki saclarda yarıçap değerinin geri esneme üzerindeki etkileri gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde en az geri esneme miktarının R10 ve 2 mm kalınlığında olduğu görülmüştür. Bu değer 30,16 mm'dir. En fazla geri esneme ise R14 ve 1,2 mm kalınlığında görülmüştür. Bu değer 37,19 mm'dir.



**Şekil 6.5.** 15 derece kalıp açıklığında DP450 kalitesindeki saclarda yarıçapın geri esneme değerlerine etkisi.

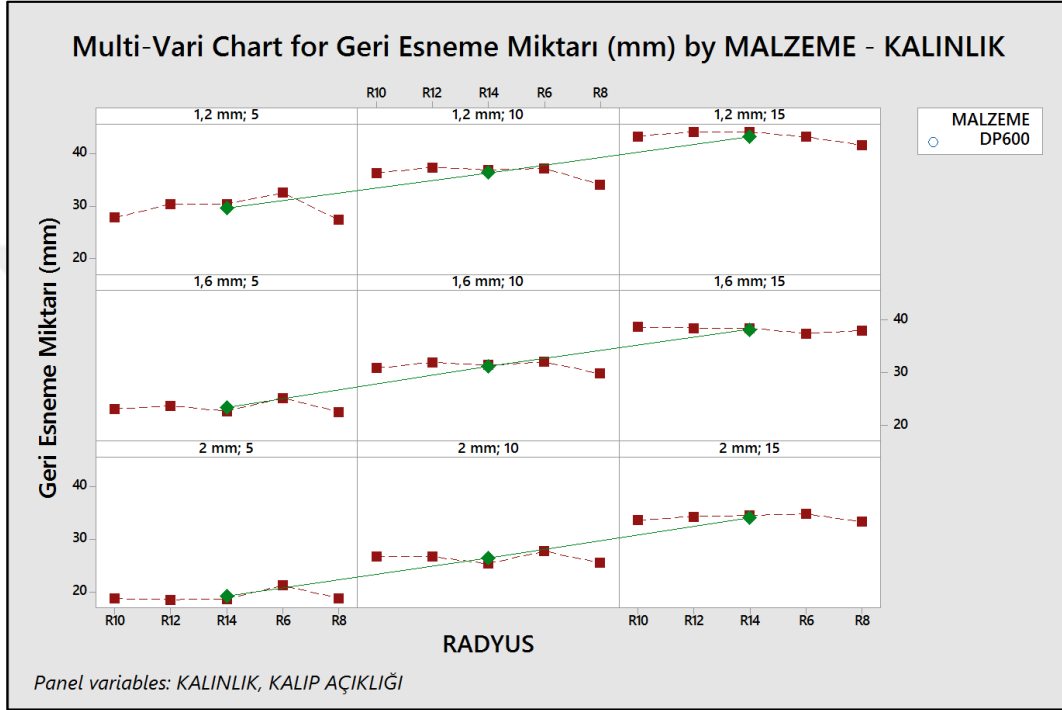
DP450 malzeme kalitesinde saclar için tüm kalıp açıklıklarında sac kalınlığı arttıkça geri esneme miktarının azaldığı görülmektedir. Yarıçap değerindeki artış ile geri esneme miktarı artışı arasında doğru bir orantı görülmemektedir.

DP600 kalitesindeki sac malzemelerin geri esneme sonuçları EK-11 ve Şekil 6.6'da verilmiştir. Minitab programı kullanılarak elde edilen Çoklu Değişken Grafiği (Multi-Vari Chart) incelendiğinde; Kalıp açıklığı arttıkça geri esneme değerlerinde artış görülmüştür. Ayrıca sac kalınlığı arttıkça geri esneme miktarı azalmıştır. DP600 kalitesindeki sac malzemeler için 1,2 mm sac kalınlığında en ideal dişi kalıp erkek yarıçap değeri R8'dir. DP600 kalitesindeki sac malzemesi için 1,6 mm ve 2 mm kalınlıklarındaki saclarda kalıp açıklığına göre ideal yarıçap değeri değişmektedir.

Geri esneme sonuçlarında yarıçap değerlerine bakılacak olursa en tutarlı olan DP600 kalitedeki sac malzeme için 15 derece kalıp açıklığında, 1,6 mm sac kalınlığındadır. Yarıçaplar yakın değerlerdedir. Geri esneme sonuçlarında yarıçap değerlerinde ise en fazla sapma olan DP600 kalitedeki sac malzeme için 5 derece kalıp açıklığında, 1,2 mm sac kalınlığındadır.

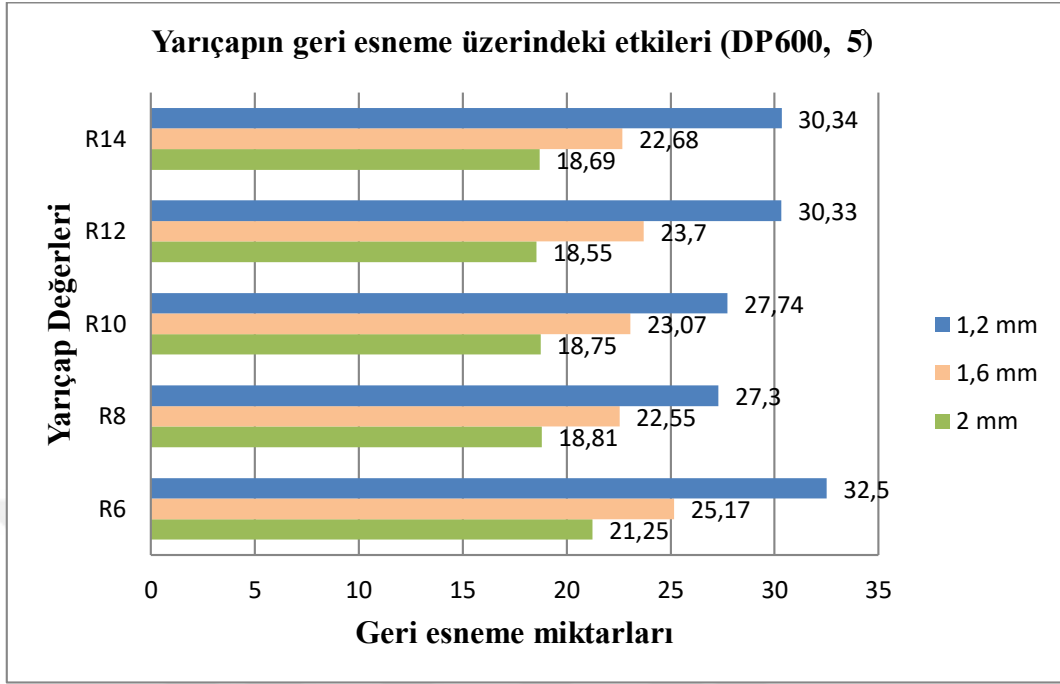
EK-11 incelendiğinde ise geri esneme sayısal ve deneysel sonuçlarının çoğu parametre için birbirine yakın çıktığı görülmektedir. Bazı durumlarda sayısal tahminler deney

sonuçlarından fazla çıkmıştır. DP600 kalitesindeki sac malzemenin, kalıp yarıçapı R12, 5 derece kalıp açıklığında ve 2 mm sac kalınlığında en az geri esneme değerini verdiği, kalıp yarıçapı R12, 15 derece kalıp açıklığı ve 1,2 mm sac kalınlığında ise en fazla geri esneme değerini verdiği görülmüştür.



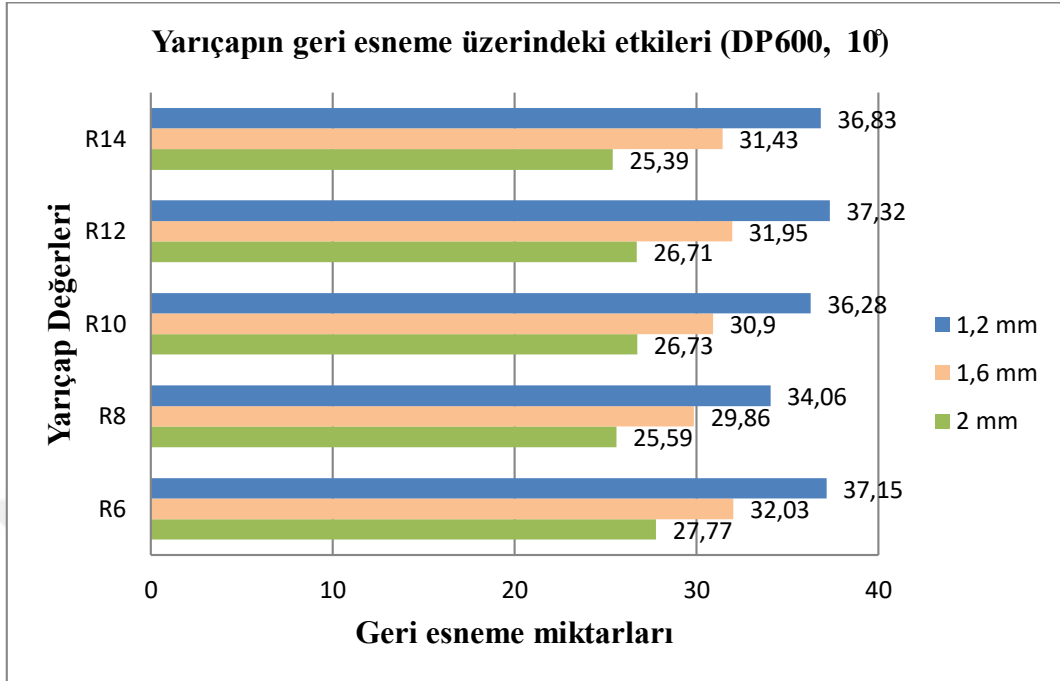
**Şekil 6.6.** DP600 kalitesindeki sacların sayısal geri esneme değerleri ve parametrelerin etkileri.

Şekil 6.7’de 5 derece kalıp açıklığında DP600 kalitesindeki saclarda yarıçap değerinin geri esneme üzerindeki etkileri gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde en az geri esneme miktarının R12 ve 2 mm kalınlığında olduğu görülmüştür. Bu değer 18,55 mm’dir. En fazla geri esneme ise R6 ve 1,2 mm kalınlığında görülmüştür. Bu değer 32,5 mm’dir.



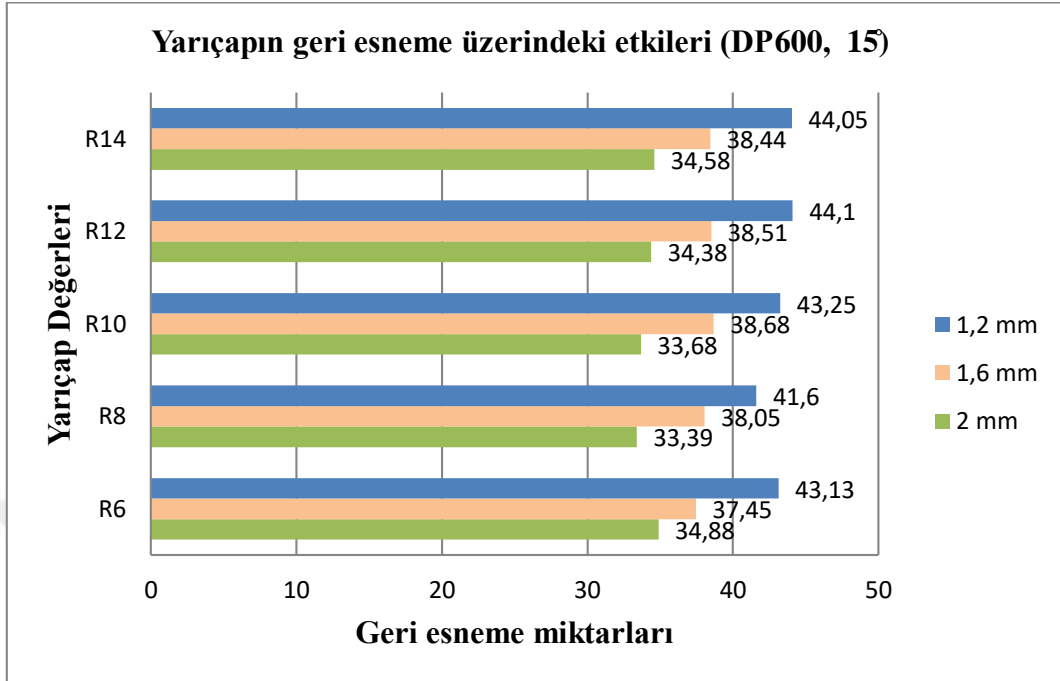
**Şekil 6.7.** 5 derece kalıp açıklığında DP600 kalitesindeki saclarda yarıçapın geri esneme değerlerine etkisi.

Şekil 6.8’de 10 derece kalıp açıklığında DP600 kalitesindeki saclarda yarıçap değerinin geri esneme üzerindeki etkileri gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde en az geri esneme miktarının R14 ve 2 mm kalınlığında olduğu görülmüştür. Bu değer 25,39 mm’dir. En fazla geri esneme ise R12 ve 1,2 mm kalınlığında görülmüştür. Bu değer 37,32 mm’dir.



**Şekil 6.8.** 10 derece kalıp açıklığında DP600 kalitesindeki saclarda yarıçapın geri esneme değerlerine etkisi.

Şekil 6.9’da 15 derece kalıp açıklığında DP600 kalitesindeki saclarda yarıçap değerinin geri esneme üzerindeki etkileri gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde en az geri esneme miktarının R8 ve 2 mm kalınlığında olduğu görülmüştür. Bu değer 33,39 mm’dir. En fazla geri esneme ise R12 ve 1,2 mm kalınlığında görülmüştür. Bu değer 44,1 mm’dir.



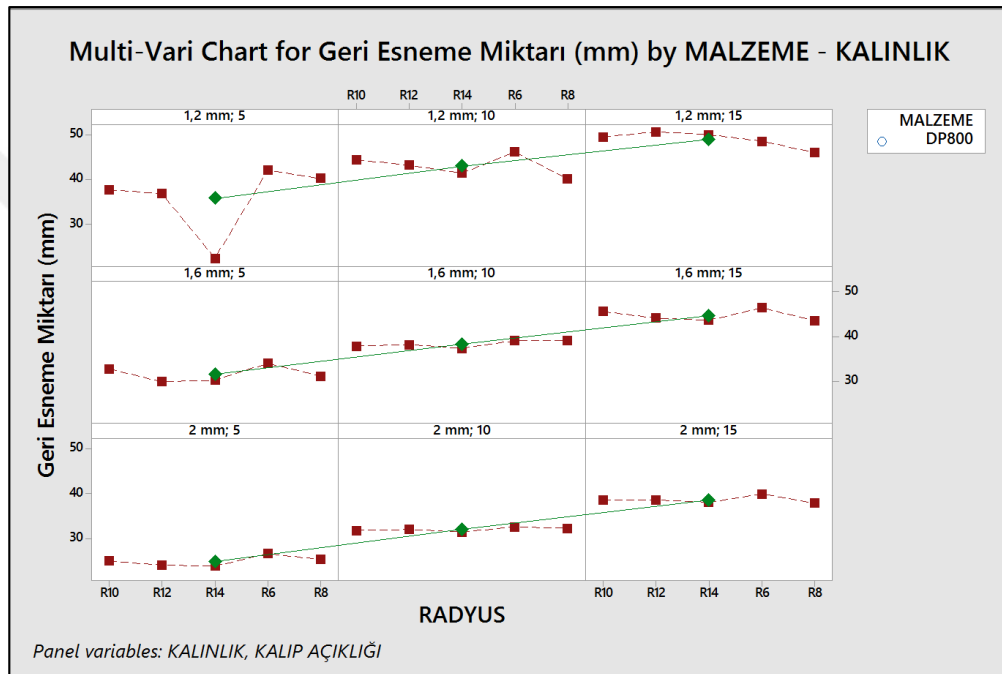
**Şekil 6.9.** 15 derece kalıp açıklığında DP600 kalitesindeki saclarda yarıçapın geri esneme değerlerine etkisi.

DP600 malzeme kalitesinde saclar için tüm kalıp açıklıklarında sac kalınlığı arttıkça geri esneme miktarının azaldığı görülmektedir. Yarıçap değerindeki artış ile geri esneme miktarı artışı arasında doğru bir orantı görülmemektedir.

DP800 kalitesindeki sac malzemelerin geri esneme sonuçları EK-12 ve Şekil 6.10'da verilmiştir. Minitab programı kullanılarak elde edilen Çoklu Değişken Grafiği (Multi-Vari Chart) incelendiğinde; Kalıp açıklığı arttıkça geri esneme değerlerinde artış görülmüştür. Ayrıca sac kalınlığı arttıkça geri esneme miktarı azalmıştır. DP800 kalitesindeki sac malzemesi için 1,6 mm ve 2 mm sac kalınlıklarında en ideal dişi kalıp erkek yarıçap değeri R14'dür. DP800 kalitesindeki sac malzemeler için 1,2 mm sac kalınlığında ve 5 derece kalıp açıklığında R14 değeri diğer yarıçap değerlerine göre geri esneme değeri düşüktür. 1,2 mm sac kalınlığı, 10 ve 15 derece açıklıklarda ise ideal yarıçap değeri için R8'dir.

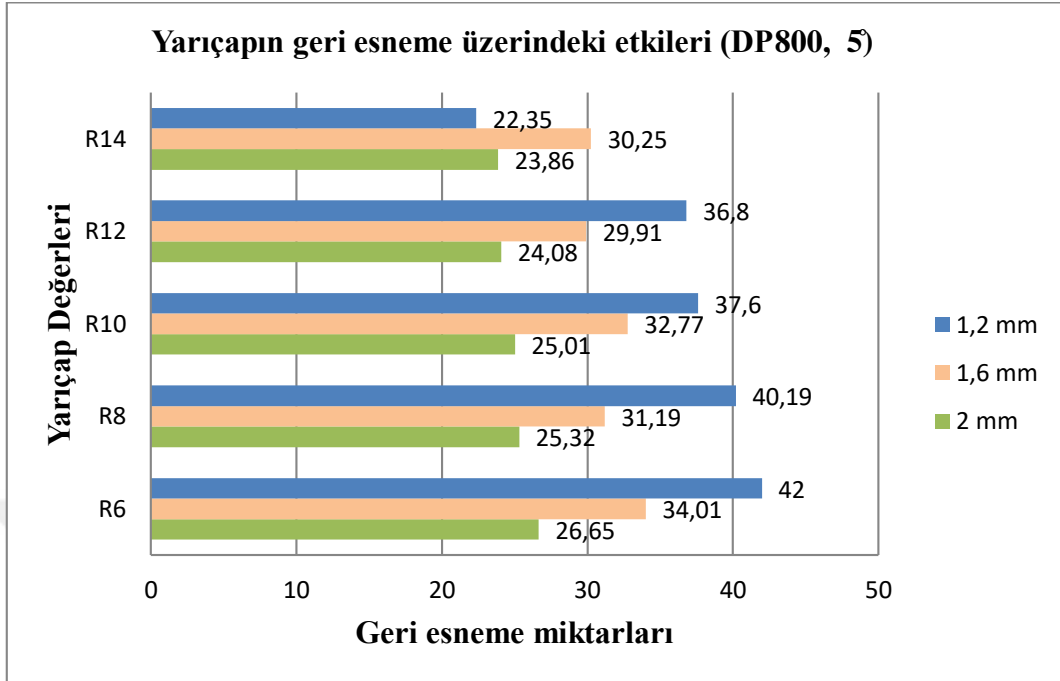
Geri esneme sonuçlarında yarıçap değerlerine bakılacak olursa en tutarlı olan DP800 kalitedeki sac malzeme için 10 derece kalıp açıklığında, 2 mm sac kalınlığındadır. Yarıçaplar yakın değerlerdedir. Geri esneme sonuçlarında yarıçap değerlerinde ise en fazla sapma olan DP800 kalitedeki sac malzeme için 5 derece kalıp açıklığında, 1,2 mm sac kalınlığındadır.

EK-12 incelendiğinde ise geri esneme sayısal ve deneysel sonuçlarının çoğu parametre için birbirine yakın çıktığı görülmektedir. Bazı durumlarda sayısal tahminler deney sonuçlarından fazla çıkmıştır. DP800 kalitesindeki sac malzemenin, kalıp yarıçapı R14, 5 derece kalıp açıklığında ve 1,2 mm sac kalınlığında en az geri esneme değerini verdiği, kalıp yarıçapı R12, 15 derece kalıp açıklığı ve 1,2 mm sac kalınlığında ise en fazla geri esneme değerini verdiği görülmüştür.



Şekil 6.10. DP800 kalitesindeki sacların sayısal geri esneme değerleri ve parametrelerin etkileri.

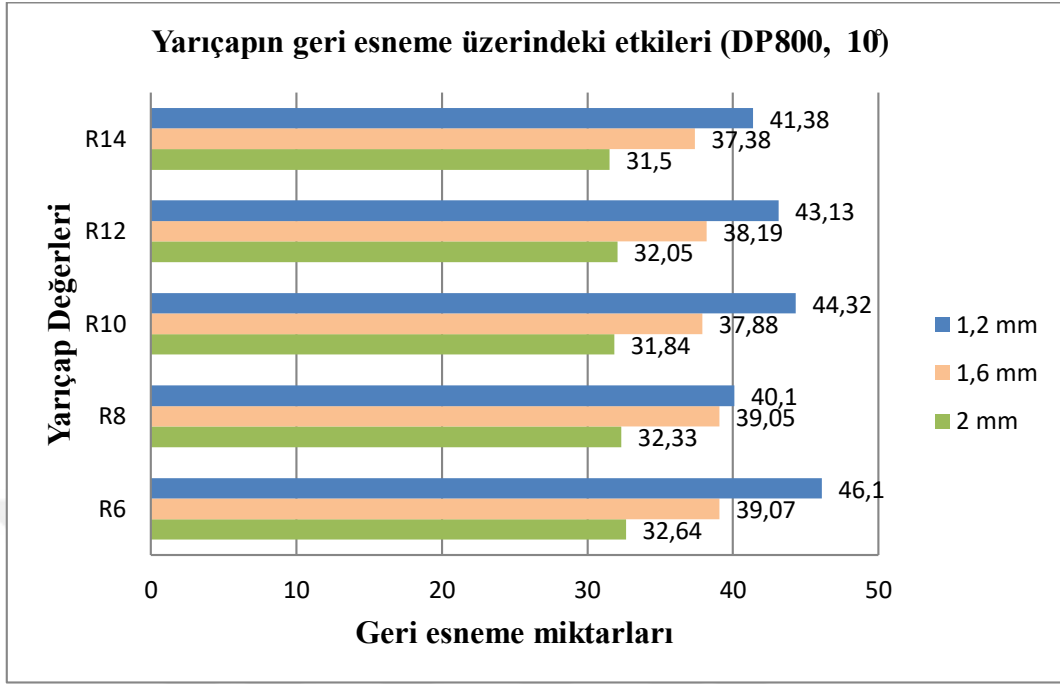
Şekil 6.11’de 5 derece kalıp açıklığında DP800 kalitesindeki saclarda yarıçap değerinin geri esneme üzerindeki etkileri gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde en az geri esneme miktarının R14 ve 1,2 mm kalınlığında olduğu görülmüştür. Bu değer 22,35 mm’dir. En fazla geri esneme ise R6 ve 1,2 mm kalınlığında görülmüştür. Bu değer 42 mm’dir.



**Şekil 6.11.** 5 derece kalıp açıklığında DP800 kalitesindeki saclarda yarıçapın geri esneme değerlerine etkisi.

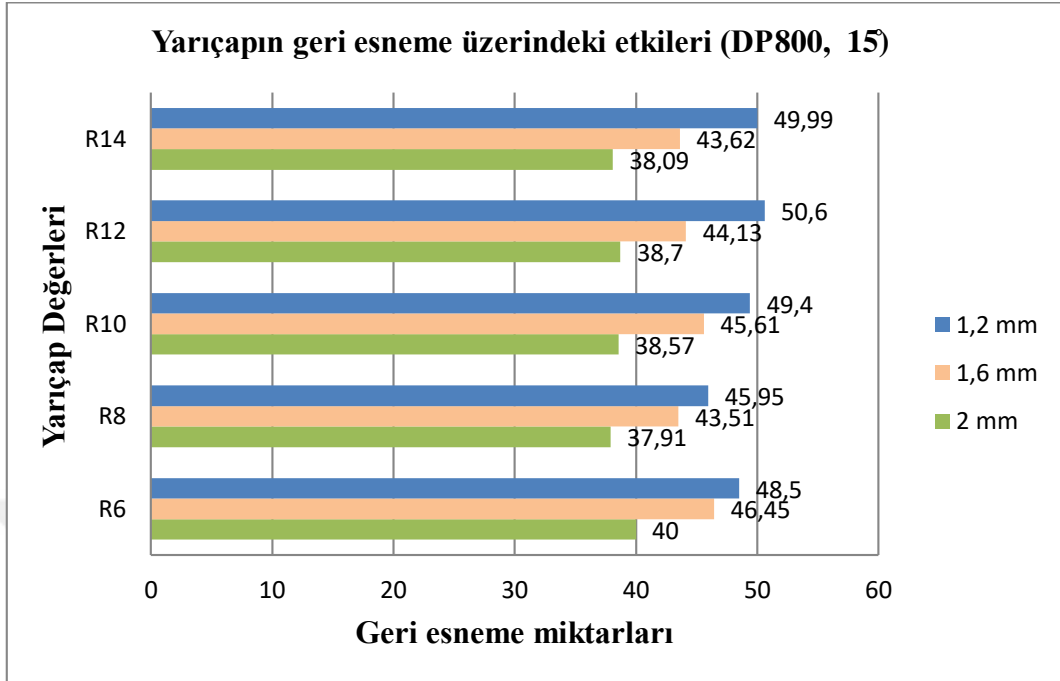
Şekil 6.12’de 10 derece kalıp açıklığında DP800 kalitesindeki saclarda yarıçap değerinin geri esneme üzerindeki etkileri gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde en az geri esneme miktarının R14 ve 2 mm kalınlığında olduğu görülmüştür. Bu değer 31,5 mm’dir. En fazla geri esneme ise R6 ve 1,2 mm kalınlığında görülmüştür. Bu değer 46,1 mm’dir.





**Şekil 6.12.** 10 derece kalıp açıklığında DP800 kalitesindeki saclarda yarıçapın geri esneme değerlerine etkisi.

Şekil 6.13’de 15 derece kalıp açıklığında DP800 kalitesindeki saclarda yarıçap değerinin geri esneme üzerindeki etkileri gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde en az geri esneme miktarının R8 ve 2 mm kalınlığında olduğu görülmüştür. Bu değer 37,91 mm’dir. En fazla geri esneme ise R12 ve 1,2 mm kalınlığında görülmüştür. Bu değer 50,6 mm’dir.



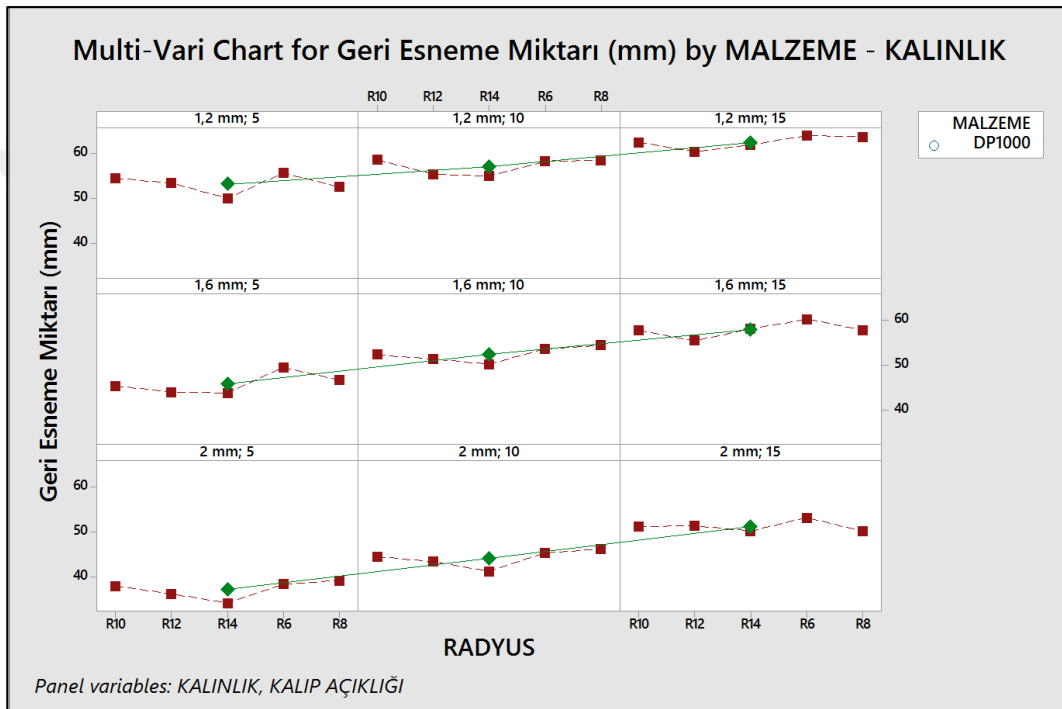
**Şekil 6.13.** 15 derece kalıp açıklığında DP800 kalitesindeki saclarda yarıçapın geri esneme değerlerine etkisi.

DP800 malzeme kalitesinde saclar için tüm kalıp açıklıklarında sac kalınlığı arttıkça geri esneme miktarının azaldığı görülmektedir. Bunun sebebi ortam değişkenleri, gürültü faktörleri olabilir. Yarıçap değerindeki artış ile geri esneme miktarı artışı arasında doğru bir orantı görülmemektedir.

DP1000 kalitesindeki sac malzemelerin geri esneme sonuçları EK-13 ve Şekil 6.14’de verilmiştir. Minitab programı kullanılarak elde edilen Çoklu Değişken Grafiği (Multi-Vari Chart) incelendiğinde; Kalıp açıklığı arttıkça geri esneme değerlerinde artış görülmüştür. Ayrıca sac kalınlığı arttıkça geri esneme miktarı azalmıştır. DP1000 kalitesindeki sac malzemeler için 1,2 mm, 1,6 mm ve 2 mm sac kalınlıklarında, 5 ve 10 derece kalıp açıklığı için ideal yarıçap değeri R14 iken; 15 derece kalıp açıklığında 1,2 mm ve 1,6 mm sac kalınlığı için ideal değer R12, 2 mm sac kalınlığı için R14’dür.

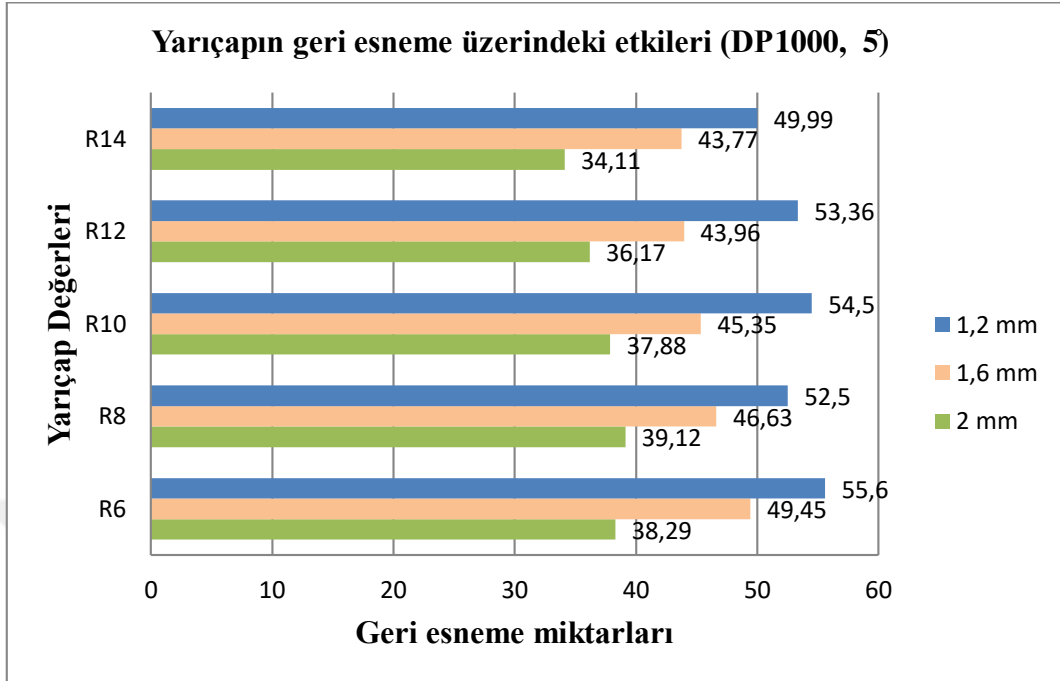
Geri esneme sonuçlarında yarıçap değerlerine bakılacak olursa en tutarlı olan DP1000 kalitedeki sac malzeme için 15 derece kalıp açıklığında, 2 mm sac kalınlığındadır. Geri esneme sonuçlarında yarıçap değerlerinde ise en fazla sapma olan DP1000 kalitedeki sac malzeme için 5 derece kalıp açıklığında, 1,2 mm sac kalınlığındadır.

EK-13 incelendiğinde ise geri esneme sayısal ve deneysel sonuçlarının çoğu parametre için birbirine yakın çıktığı görülmektedir. Bazı durumlarda sayısal tahminler deney sonuçlarından fazla çıkmıştır. DP1000 kalitesindeki sac malzemenin, kalıp yarıçapı R14, 5 derece kalıp açıklığında ve 2 mm sac kalınlığında en az geri esneme değerini verdiği, kalıp yarıçapı R6, 15 derece kalıp açıklığı ve 1,2 mm sac kalınlığında ise en fazla geri esneme değerini verdiği görülmüştür.



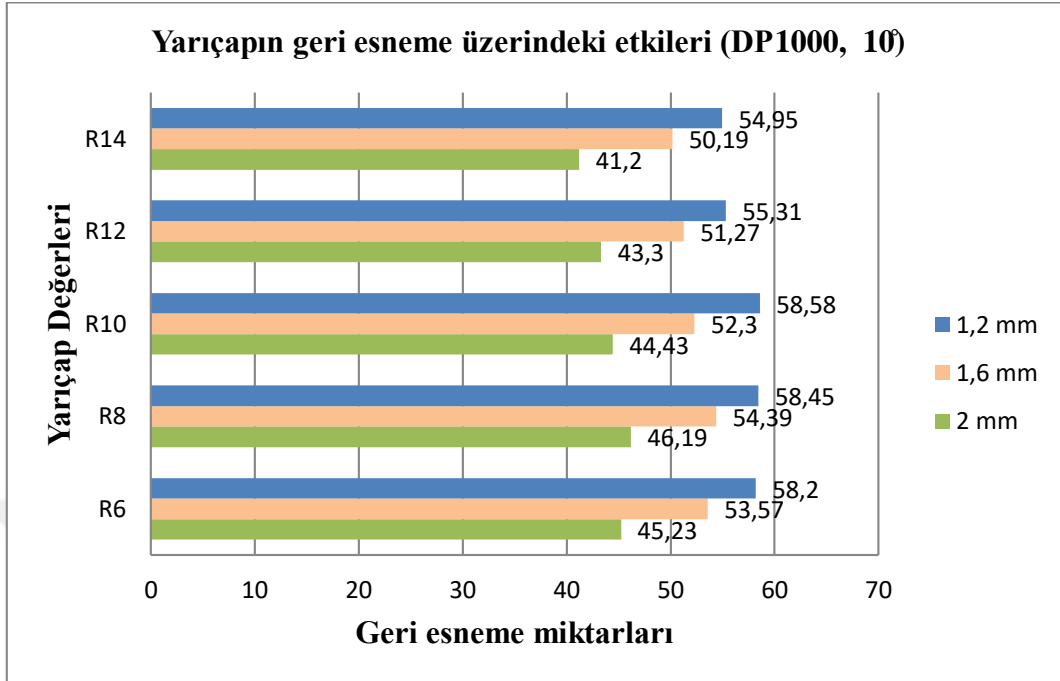
**Şekil 6.14.** DP1000 kalitesindeki sacların sayısal geri esneme değerleri ve parametrelerin etkileri.

Şekil 6.15’de 5 derece kalıp açıklığında DP1000 kalitesindeki saclarda yarıçap değerinin geri esneme üzerindeki etkileri gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde en az geri esneme miktarının R14 ve 1,2 mm kalınlığında olduğu görülmüştür. Bu değer 34,11 mm’dir. En fazla geri esneme ise R6 ve 1,2 mm kalınlığında görülmüştür. Bu değer 55,6 mm’dir.



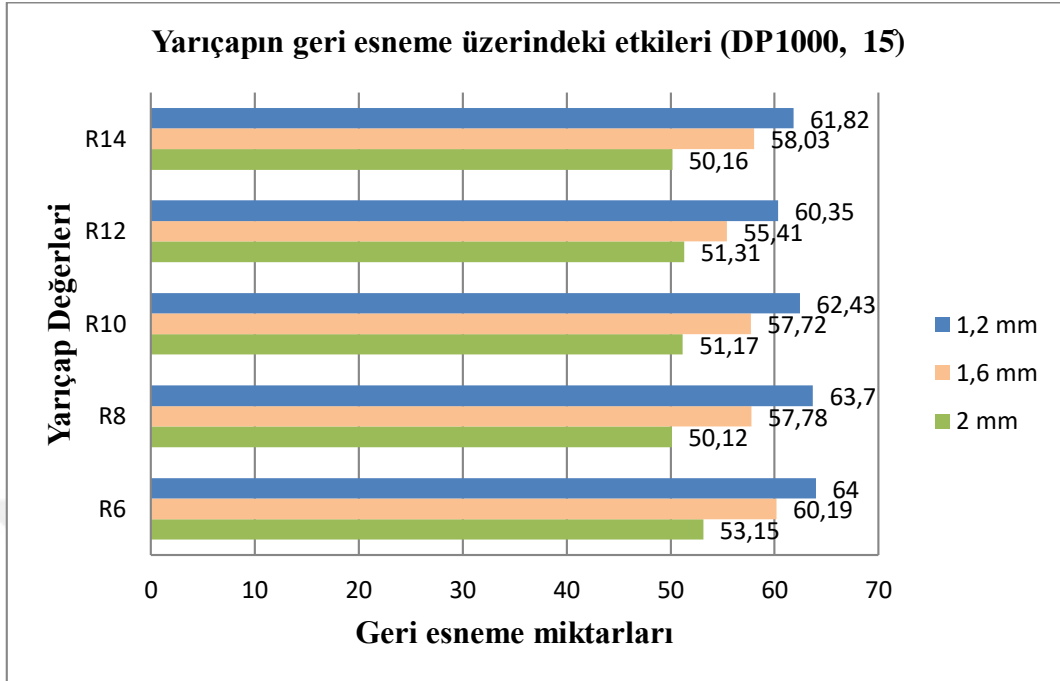
**Şekil 6.15.** 5 derece kalıp açıklığında DP1000 kalitesindeki saclarda yarıçapın geri esneme değerlerine etkisi.

Şekil 6.16'da 10 derece kalıp açıklığında DP1000 kalitesindeki saclarda yarıçap değerinin geri esneme üzerindeki etkileri gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde en az geri esneme miktarının R14 ve 1,2 mm kalınlığında olduğu görülmüştür. Bu değer 41,2 mm'dir. En fazla geri esneme ise R10 ve 1,2 mm kalınlığında görülmüştür. Bu değer 58,58 mm'dir.



**Şekil 6.16.** 10 derece kalıp açıklığında DP1000 kalitesindeki saclarda yarıçapın geri esneme değerlerine etkisi.

Şekil 6.17’de 15 derece kalıp açıklığında DP1000 kalitesindeki saclarda yarıçap değerinin geri esneme üzerindeki etkileri gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde en az geri esneme miktarının R8 ve 2 mm kalınlığında olduğu görülmüştür. Bu değer 50,12mm’dir. En fazla geri esneme ise R6 ve 1,2 mm kalınlığında görülmüştür. Bu değer 64 mm’dir.

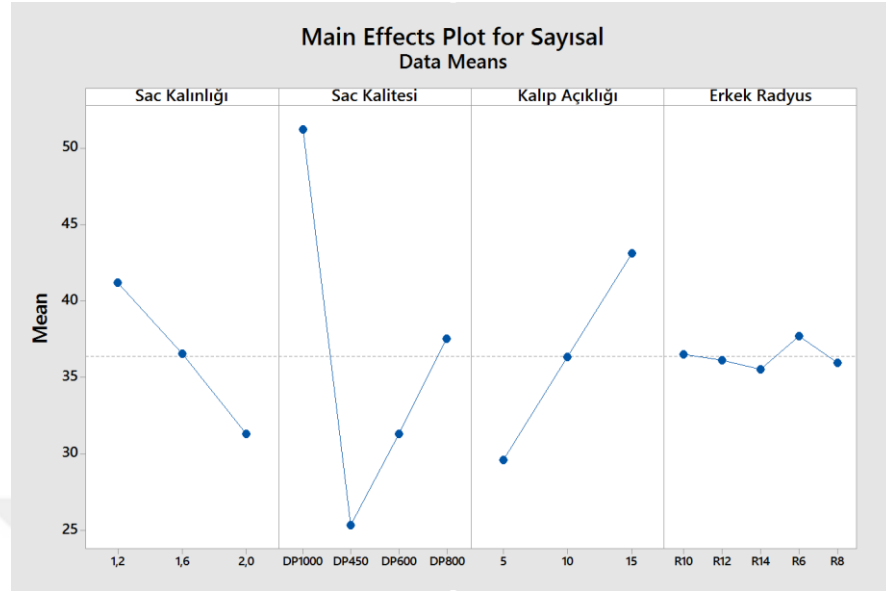


**Şekil 6.17.** 15 derece kalıp açıklığında DP1000 kalitesindeki saclarda yarıçapın geri esneme değerlerine etkisi.

DP1000 malzeme kalitesinde saclar için tüm kalıp açıklıklarında sac kalınlığı arttıkça geri esneme miktarının azaldığı görülmektedir. Yarıçap değerindeki artış ile geri esneme miktarı artışı arasında doğru bir orantı görülmemektedir.

Geri esnemenin deney sonuçları ve sayısal sonuçları karşılaştırıldığında, DP1000 kalite sac malzemeler hariç sayısal sonuçların deneysel sonuçlara yaklaştığı görülmektedir (EK-10 ve 13 arası). Sonuçların birbir örtüşmemesinde gürültü faktörü etkindir. Burada gürültü faktörü olarak imalat aşamasındaki hatalar, ölçüm yapılırken oluşan hatalar ve simülasyondan kaynaklanan hatalar gösterilebilir.

Şekil 6.18’de Minitab programı kullanılarak Ana Etki Grafiği (Main Effects Plot) oluşturulmuştur. Bu grafikte sayısal sonuçlar çıktı olarak tanıtılmıştır. Girdi olarak sac kalınlığı, sac kalitesi, kalıp açıklığı ve kalıp erkek yarıçapı tanıtılmıştır.



**Şekil 6.18.** Minitab ana etki grafiği.

Ana etki grafiğine göre, kalıp açıklığı arttıkça geri esneme miktarı artmaktadır. Aksine sac kalınlığı arttıkça geri esneme miktarı azalmaktadır. DP saclarda sac kalitesi arttıkça çekme mukavemeti arttığından geri esneme miktarında artış görülmektedir. DP1000 sac kalitesi normal artışın üzerinde bir artış göstermektedir. Erkek yarıçapların geri esneme üzerinde sıralı bir artışı görülmemiştir. Yarıçapların etkisine bakıldığında en az geri esneme R14 değerinde gözlemlenmiştir. En yüksek geri esneme ise R6 değerinde gözlemlenmiştir.

Tüm deney şartları göz önüne alındığında; en düşük geri esneme davranışı 2 mm sac kalınlığında, 5 derece kalıp açıklığında, dişi kalıp erkek yarıçap değeri 8 olduğunda, DP450 kalitesinde sac malzemesi kullanıldığında elde edilmiş olup, geri esneme miktarı 14,16 mm olarak elde edilmiştir. En büyük geri esneme davranışı 1,2 mm sac kalınlığında, 15 derece kalıp açıklığında, dişi kalıp erkek yarıçap değeri 6 olduğunda, DP1000 kalitesinde sac malzemesi kullanıldığında elde edilmiş olup, geri esneme miktarı 64 mm olarak elde edilmiştir.

Çalışmanın genel sonuçları şöyle sıralanabilir,

1. Geri esneme davranışının, kalıp ve malzeme parametrelerine bağlı olarak değiştiği tespit edilmiştir.
2. Kalıp açıklığı arttıkça geri esneme miktarı artmıştır.
3. Sac malzemenin kalınlığı arttıkça geri esneme miktarı azalmıştır.

4. DP saclarda mukavemet değerleri yüksek olduğundan geri esneme davranışı sac kalitesi arttıķa artmıştır. Uygulanan kuvvet arttıķa geri esneme artacaktır.
5. Yarıçapa bağlı olarak numunelerde oluşan geri esneme davranışı değişkenlik göstermektedir.
6. Autoform programı ile yapılan geri esneme davranışına ait sayısal sonuçların deneysel sonuçlarla yaklaşık uyum içinde olduğu tespit edilmiştir. Deneysel çalışmalara başlamadan önce bu parametrelerle analiz programında tahminler yapmak hem maliyet hem zaman tasarrufu sağlamada faydalı olacaktır. Autoform programının sac şekillendirme simülasyonunda gerçeğe yakın sonuçlar vermede güvenilir olduğunu söylemek mümkündür.

Gelecekteki araştırmacılar için bu çalışmanın ardından önerilebilecek çalışmalar şu şekilde sıralanabilir:

- Farklı şekillendirme yöntemlerinde geri esneme davranışlarının analizini yapmak,
- Farklı analiz programları kullanılarak yazılımların güvenilirliklerini karşılaştırmak amaçlı deneyler yapılabilir.
- Yağlama oranının geri esneme etkileri araştırılabilir.



## KAYNAKLAR DİZİNİ

Advanced High Strength Steels Application Guidelines Version 6.0 (2017). International Iron and Steel Institute-Committee on Automotive Applications.

Aran, A., Demirkol, M. (1995). İTÜ Makine Fakültesi İmal Usülleri Ders Notları, Plastik Şekil Verme ve Teknolojisi.

Arslan, B. (2007). Geri Esnemenin Sac Parçaları Biçim Tamlığı Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi ve Sonlu Elemanlar Yöntemi Uygulamaları ile Değerlendirilmesi. (Yüksek Lisans Tezi), Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Bekar, D. (2011). Çift Fazlı Çeliklerde Şekil Verme Operasyonları Sonucunda Oluşan Geri Esnemenin Gürbüz Optimizasyonu. (Yüksek Lisans Tezi), TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Bilir, O. G. (2014). Orta Karbonlu Dual Fazlı Çeliklerde Faz Dönüşümlerinin Termodinamik Modellenmesi ve Mikroyapısal Karakterizasyonu. (Yüksek Lisans Tezi), Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.

Bolvadin, H. (1990). Metallographic and Mechanical Studies on plain Carbon and Vanadium Containing Dual Phase Structural Steels.(M.S. Thesis), METU, Ankara.

Chongthairungruang, B., Uthaisangsuk, V., Suranuntchai, S., Jiratharanat, S. (2013). Springback Prediction in Sheet Metal Forming of High Strength Steels, *Materials and Design*, 50:253-266.

Çapan, L. (2003). *Metallere Plastik Şekil Verme*, Çağlayan Kitabevi, İstanbul.

Çelik, A. (2010) Atatürk Üniversitesi, Talaşlı Üretim Yöntemleri Makine ve Teçhizat Ders Notu.

Çimenoglu, H. (1984). Alaşımız Dual-Fazlı Çeliklerde Mikroyapı-Mekanik Özellik İlişkileri. (Yüksek Lisans Tezi), İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Davies, R. G. (1978) Influence Of Martensite Composition And Content On The Properties Of Dual Phase Steels, *Metallurgical Transactions A*, 9:671-679.

Değirmenci, H. (2006). Çelik Sacların Mekanik Özelliklerinde Ortaya Çıkan Değişimler ve Nedenleri ile Bunların Şekillendirme Prosesi Üzerindeki Etkileri, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Demirci, H. İ., Yaşar, M., Demiray, K. ve Karalı, M. (2005). Derin çekme işlemlerinde baskı plakasının cidar kalınlığı üzerindeki etkisinin Ansys Ls-Dyna ile incelenmesi, 4th International Advanced Technologies Symposium, Konya, Eylül 28-30.

### KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Demirkol, M. (2010) İTÜ Makine Mühendisliği Bölümü, Plastik Şekil Verme Teknolojisi Ders Notları.

Erdin, E. (2003). Sünek olmayan / yüksek mukavemetli metal sacların ısıtılarak şekillendirilmesi. (Yüksek Lisans Tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Ergüy, C. G. (2008). Yüksek Dayanımlı Düşük Alaşımli Çelik Sac Üzerinde Geri Esnemenin Şekillendirmeye Etkisinin İncelenmesi (Doktora Tezi), Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Ergene, B. (2015). Çift Fazlı Çeliklerin Deformasyon Davranışının İncelenmesi (Yüksek Lisans Tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Esat, V. (2002). Bükme İşleminde Geri Esnemenin Sonlu Elemanlar Analizi. (Yüksek Lisans Tezi), Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Işıқтаş, A. (2009). Farklı Kalınlıklardaki DKP ve Paslanmaz Sacların Farklı Açılarda Yapılan V-Bükme İşlemindeki Geri Esnemelerinin İncelenmesi. (Yüksek Lisans Tezi), Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir.

Genel, K. (2015). *Malzeme Bilimi ve Mühendisliği*, Nobel Yayın.

Giordano, L., Mutteazzi, P., Tizianni, A. ve Zambon, A. (1991). Retained Austenite Variation In Dual Phase Steel After Mechanical Stressing And Heat Treatment Material Science and Engineering. A31,.215-219.s.

Gomes, C., Onipede, O., Lovell, M. (2005). Investigation of Springback in High Strength Anisotropic Steels, *Journal of Material Processing Technology* 159:91-98.

Gök, K., Erdem, M., Gök, A. ve Alkan, M. (2015). The Effects onto Springback of Waiting Time in Sheet Metal Forming, *Journal of Engineering and Fundamentals*, 2(2), 69-73.

Gök, K., Gök, A. ve Neşeli, S. (2018). *ANSYS WORK BENCH – Bilgisayar Destekli Yapısal Analiz Uygulamaları*, Abaküs Kitap.

Gündü, T. (2000). Derin çekme saclarında derin çekilebilirlik özelliklerinin belirlenmesi. (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Güneş, A. T. (1989). *Pres İşleri Tekniği*, 1, 184-241, Erk Yayıncılık, Ankara.

<http://www.autosteel.org>.

<http://www.hamitarıslan.com>.

<http://turkish.climate-chambers.com/sale-7601535-1-20kn-computer-servo-control-lab-test-equipment-universal-tensile-tester.html>.

## KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

<https://grupotomasyon.com.tr/services/autoform/>.

Kahraman, M. (2008). Levha malzemelerin sonlu elemanlar yöntemiyle geri esnemesinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Kalpajian, S. ve Schmid, S. R. (2001). *Manufacturing Engineering and Technology*, Practice Hall Inc., New Jersey.

Kaptı, A. O. (2015). Sakarya Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Kalıpcılık Tekniği Ders Notu.

Kartal F., (2010). AISI 316l paslanmaz çeliğinin işlenebilirliğinin sonlu elemanlar metodu ile modellenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon.

Kılıç, S. (2009). DP600 Çeliğinin Geri Esneme Davranışının İncelenmesi. (Yüksek Lisans Tezi), Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Niğde.

Kim, H. S. ve Koç, M. (2008). Numerical investigations on springback characteristics of aluminum sheet metal alloys in warm forming conditions, *Journal of Materials Processing Technology*, 204, 370-383.

Lange, K. (1985). *Handbook of Metal Forming*. McGraw Hill, New York.

Ling, Y. E., Lee, H. P. ve Cheok, B. T., (2005). Finite Element Analysis of Springback in L-Bending of Sheet Metal, *Journal of Materials Processing Technology*, 168, 296-302.

Llewellyn, D. T. ve Hillis, D. J. (1996). Dual Phase Steels, *Ironmaking and Steelmaking Review* 23, 471-478.

Mielnik, E. M. (1991). *Metalworking Science and Engineering*. McGraw Hill Inc., New York.

Özdemir, M. (2011). Bükme Kalıplarında S235JR Malzemenin Geri Esneme Miktarının Deneysel Olarak İncelenmesi. (Yüksek Lisans Tezi), Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Özer, F. (2011). Geliştirilmiş Yüksek Mukavemetli Çeliklerde Şekil Verme Operasyonları Sonucu Oluşan Geri Esnememin Doğru Tahmini ve Telafisi. (Yüksek Lisans Tezi), TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Patois, C. ve Barbier, M. (2014). Body-in-white of the New Peugeot 308, Euro Car Body 2014 - 16th Global Car Body Benchmarking Conference.

Pourboghrat, F., Chu, E. (1995). "Prediction of spring-back and side-wallcurl in 2-D draw bending", *Journal of Materials Processing Technology*, Aluminum Co. of America, Alcoa Center, PA, U.S.A, 50 : 361-374.

### KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Pürçek, G. (2014). Metalik Malzemelerde Uygulanan Mekanik Deneyler (Ders Notları), Trabzon.
- Rashid, M. S. (1977). "Relationship Between Steel Microstructure and Formability of Formable HSLA and Dual Phase Steels", Ed. By., Davenport, A.T., AIME, 1-26.
- Samek, L. ve Krizan, D. (2012). Steel – Material Of Choice For Automotive Lightweight Applications, *Proceedings of Metal*, 551-556.
- Savaşkan, T. (2015). *Malzeme Bilimi ve Malzeme Muayenesi*, Celepler Matbaacılık, 1.Baskı.
- Soyuçok, A. ve Soyuçok, Ö. (2015). *Cisimlerin Mukavemeti*, 6. Basımdan Çeviri, Literatür Yayıncılık.
- Sönmez, E. (2015). Metal Şekillendirme İşleminde Geri Esneme Tahmininin Deneysel ve Sonlu Elemanlar Yöntemi ile İncelenmesi. (Yüksek Lisans Tezi), Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Speich, G. R., Demarest, V. A., Miller, R. L. (1981). Formation of Austenite During Intercritical Annealing of Dual-Phase Steels, *Metallurgical and Materials Transactions*, 8, 1419-1428.
- Şahin, Ç. Ö. (2013). Sac Levhaların V-bükme Sonucu Geri Esneme Davranışlarının İncelenmesi. (Yüksek Lisans Tezi), Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Şen, H. (2015). Levhaların Bükülmesinde Geri Esneme Davranışının Sonlu Elemanlar Yöntemi ile İncelenmesi (Yüksek Lisans Tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Taylor, B. (1988). Formability Testing of Sheet Metals, Metals Handbook – 14 (Forming and Forging), *American Society for Metals*, Metals Park, Ohio.
- Tekaslan, Ö., Gerger, N., Şeker, U. (2008). Determination of spring-back of stainless steel sheet metal in "V" bending dies, *Materials and Design*, 29:1043-1050.
- Tekiner, Z. (2004). An Experimental Study on The Examination of Springback of Sheet Metal with Several Thicknesses and Properties in Bending Dies, *Journal of Materials Processing Technology*, 145,109-117.
- Turan, S.E. (2009). Düz Kenar Bükme ve Döner Kalıpla Kenar Bükme İşlemlerinin Geri Yaylanma Üzerine Etkilerinin Deneysel Olarak İncelenmesi. (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Uslu, E. (2014). Sac Malzemelerin Bükülmesinde Geri Esneme Davranışının Araştırılması. (Yüksek Lisans Tezi), Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Ünal, R. (2009) İmalat Teknolojileri Talaşlı İmalat Yöntemleri Ders Notu

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

Wagoner, R. H., Chenot, J. L. (2001). *Metal Forming Analysis*. Cambridge University Pres, London.

Wang, W., Wei, X. (2013). The effect of martensite volume and distribution on shear fracture propagation of 600–1000 MPa dual phase sheet steels in the process of deep drawing, *International Journal of Mechanical Sciences*, 67, 100–107.

W. L. Xu, C. H. M., C. H. Li, W. J. Feng. (2004). Sensitive Factors in Springback Simulation for Sheet Metal Forming. *Journal of Materials Processing Technology* 151, 217–222.

Yenice, M. M. (2006). Bükme ile Şekillendirilen Saclarda Geri Esneme Davranışının İncelenmesi. (Yüksek Lisans Tezi), Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.

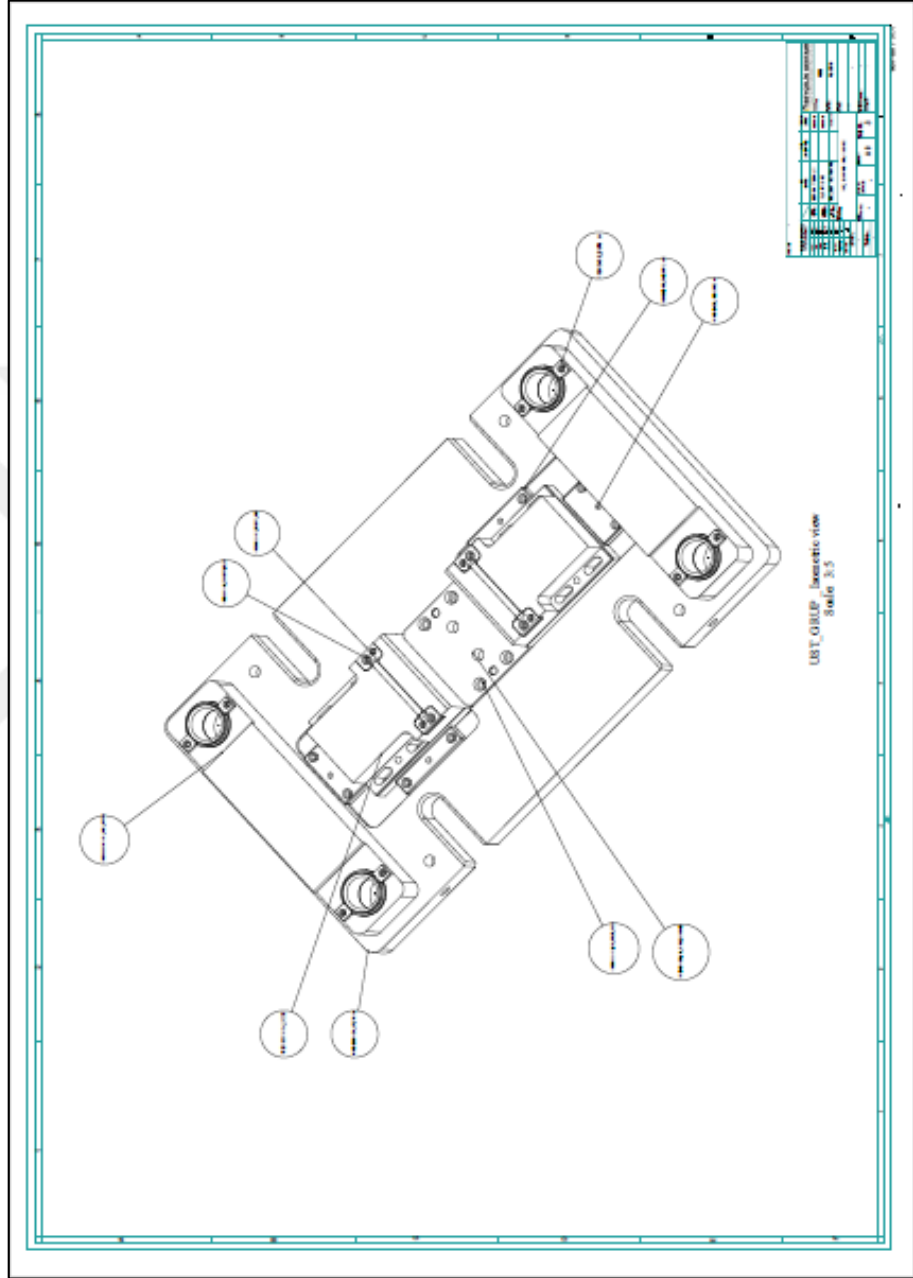
Yıldız, H. ve Kırılı, O. (2004). Derin çekme işleminin doğrusal olmayan sonlu elemanlar metodu yardımıyla modellenmesi, *Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 10(3) 317-326.

Zhu, X. (1999). Theoretical Analysis of Sheet Metal Formability. (A Dissertation for the Degree of Doctor of Philosophy), Mechanical Engineering Department, Michigan Technological University, Michigan.





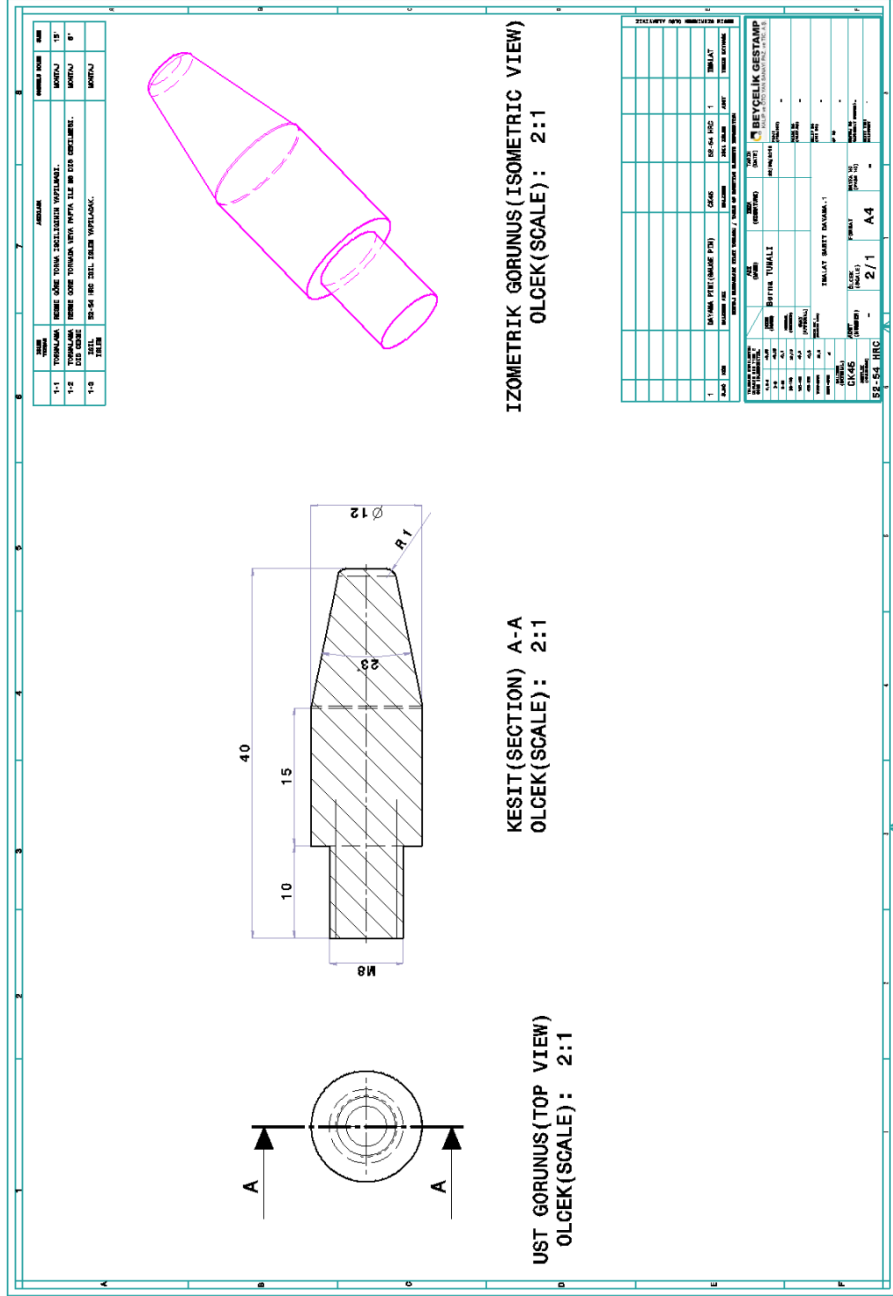
### Ek-3 Üst Grup Montajının Teknik Resmi



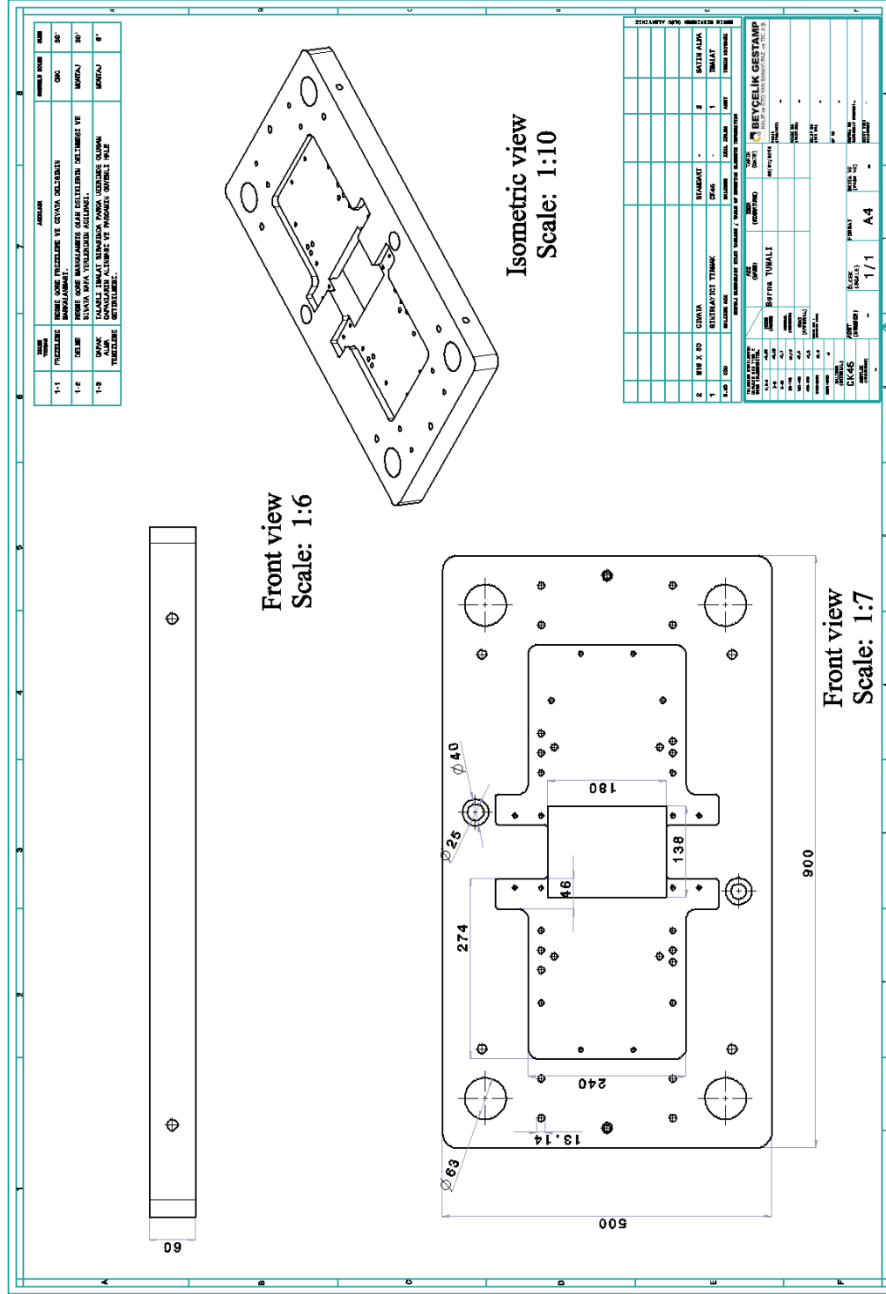




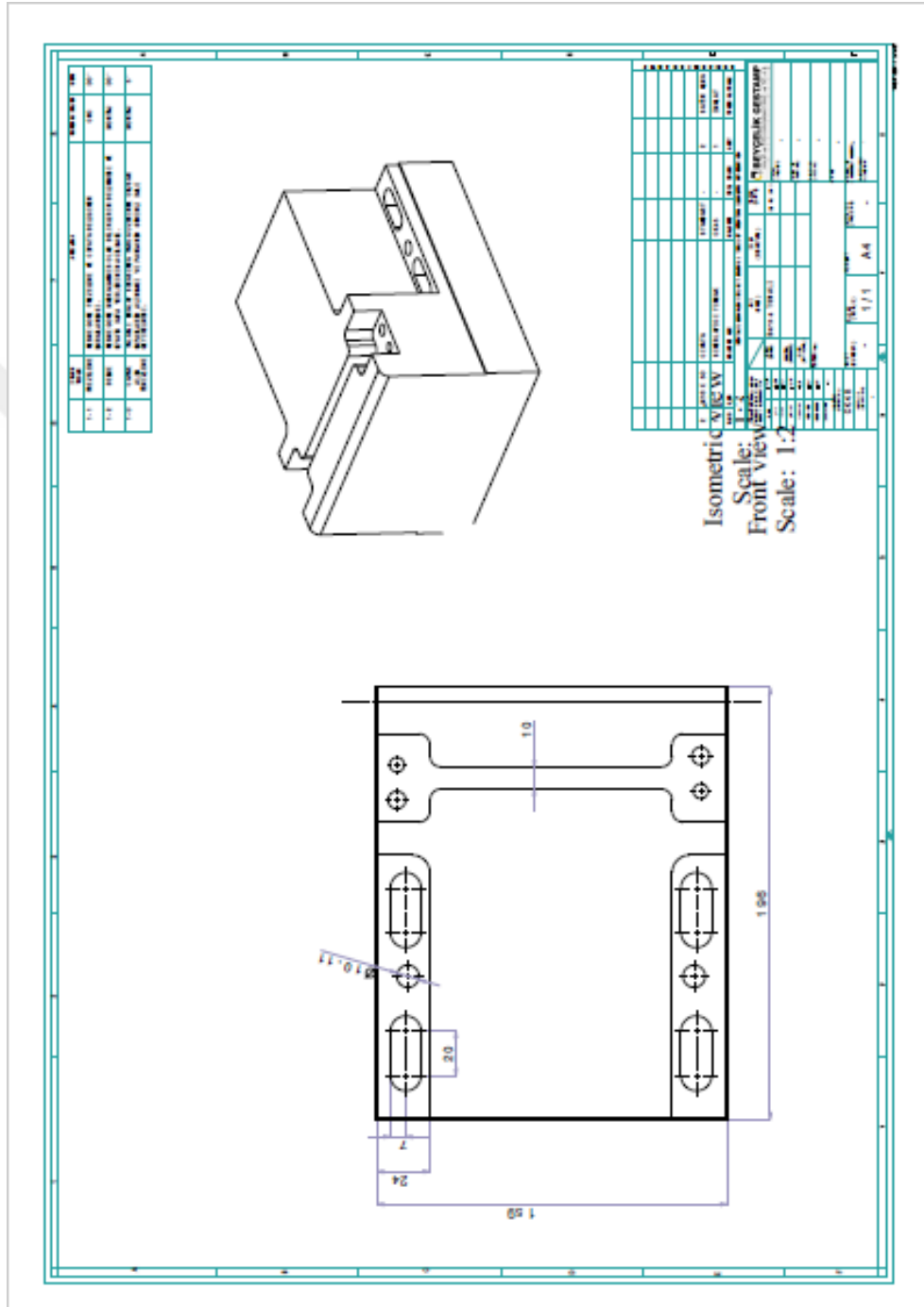
## Ek-5 Tasarımda Kullanılan Dayamaların Teknik Resim Detayları



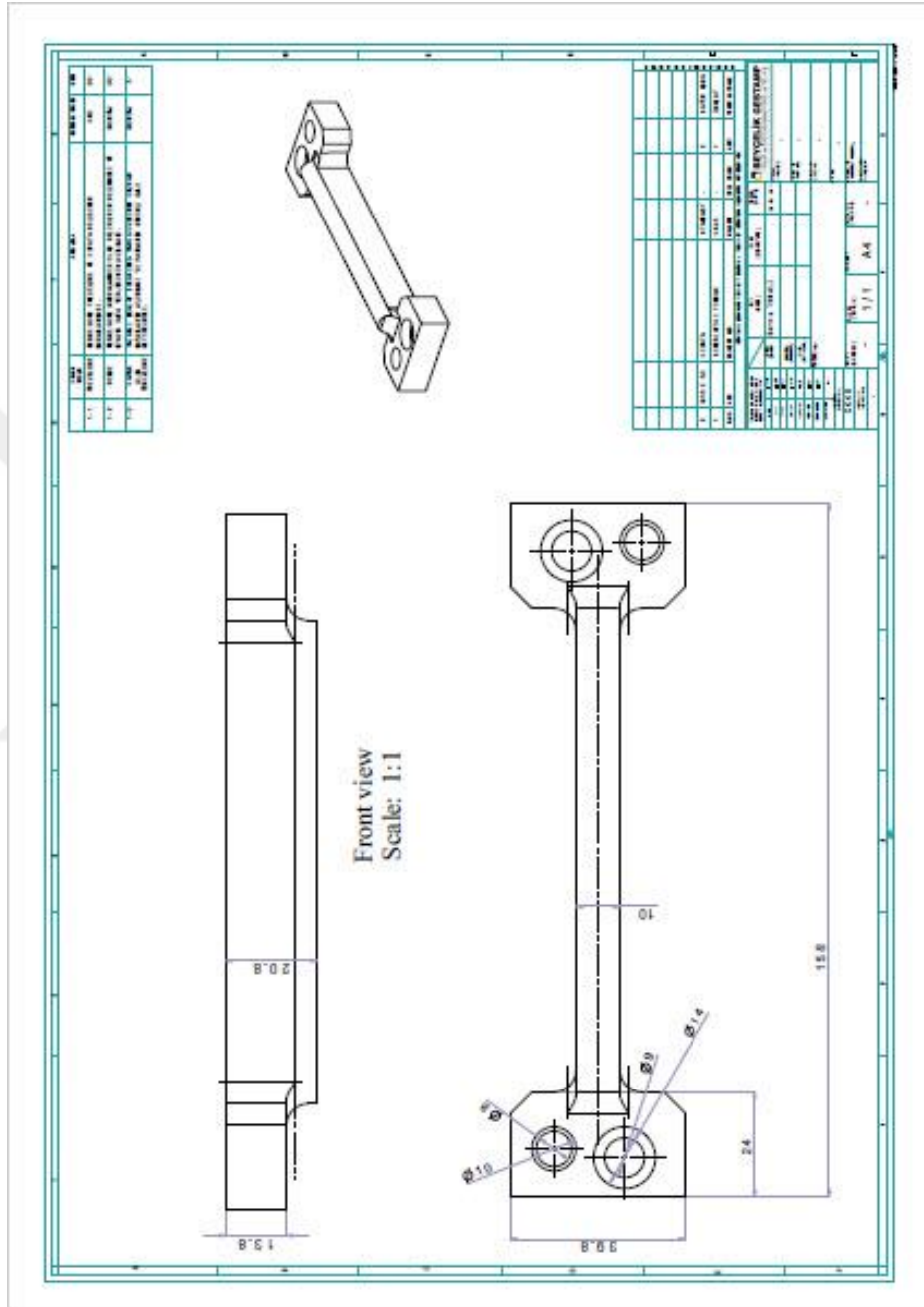
## Ek-6 Tasarımda Kullanılan Pot Çemberinin Teknik Resim Detayları



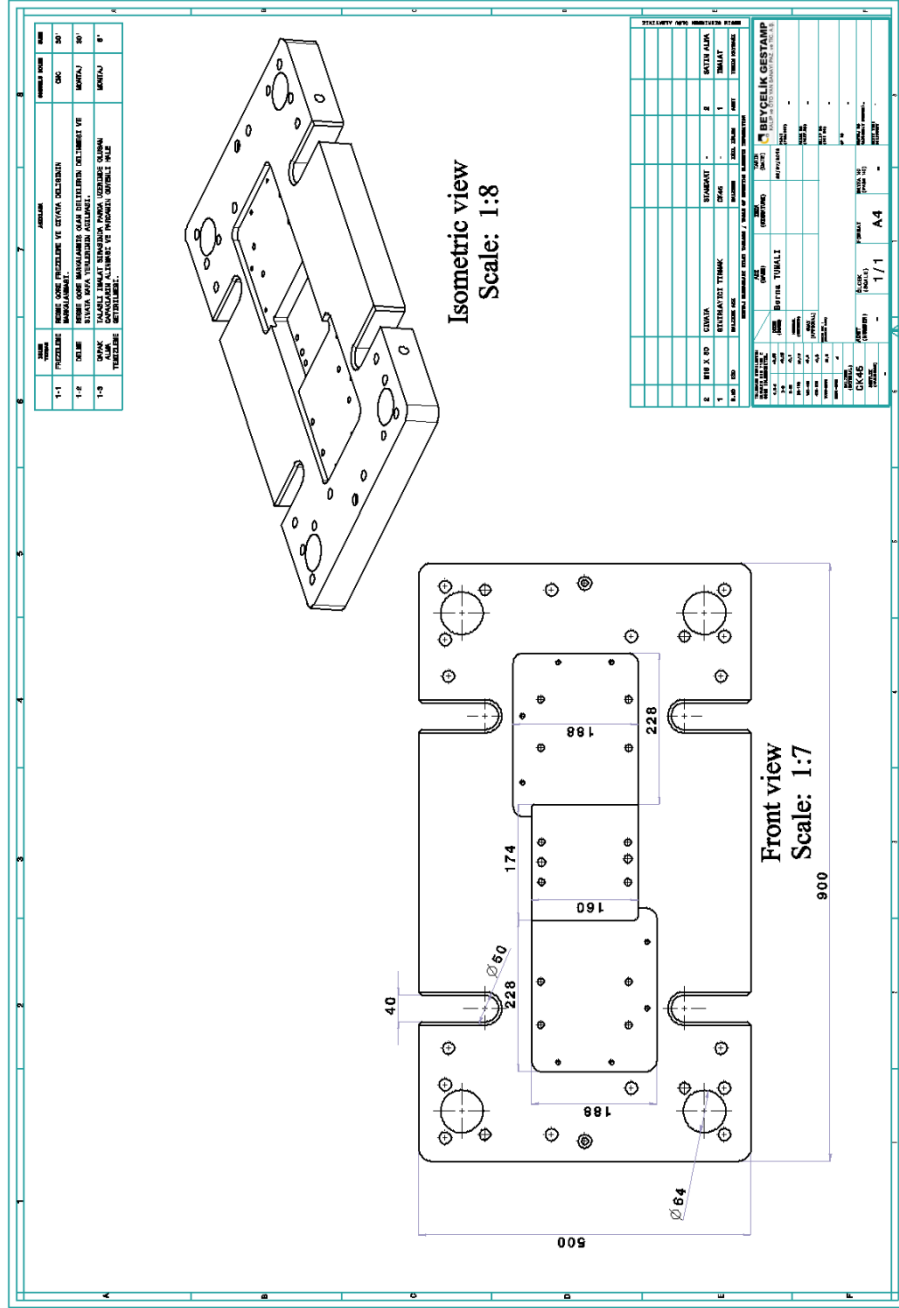
## Ek-7 Tasarımda Kullanılan Dişi Çeliğin Teknik Resim Detayları



## Ek-8 Tasarımda Kullanılan İnsert Çeliğin Teknik Resim Detayları



## Ek-9 Tasarımda Kullanılan Dişi Tablanın Teknik Resim Detayları



**Ek-10 DP450 Kalitesindeki Sacların Parametrelere Göre Sayısal ve Deneysel Ölçümleri ve Farkları**

MALZEME	YARIÇAP	KALIP AÇIKLIĞI	KALINLIK	Sayısal (mm)	Deneysel (mm)	Fark (mm)
DP450	R6	5	1,2 mm	23,10	23,8	0,7
			1,6 mm	18,94	23,18	4,24
			2 mm	15,17	14,86	-0,31
	R8		1,2 mm	20,07	25,3	5,23
			1,6 mm	16,51	23,92	7,41
			2 mm	14,16	15,91	1,75
	R10		1,2 mm	21	23,5	2,5
			1,6 mm	17,99	22,28	4,29
			2 mm	14,91	14,39	-0,52
	R12		1,2 mm	22,44	24,09	1,65
			1,6 mm	18,07	22,24	4,17
			2 mm	15,07	14,59	-0,48
	R14	1,2 mm	21,95	22,5	0,55	
		1,6 mm	17,62	15,67	-1,95	
		2 mm	15,26	15,11	-0,15	
	R6	10	1,2 mm	28,5	34,2	5,7
			1,6 mm	25,58	27,45	1,87
			2 mm	22,23	23,1	0,87
	R8		1,2 mm	26,3	32	5,7
			1,6 mm	23,92	30,74	6,82
			2 mm	22,31	23,14	0,83
	R10		1,2 mm	28,88	33,93	5,05
			1,6 mm	24,42	29,08	4,66
			2 mm	22,17	25,03	2,86
	R12		1,2 mm	26,86	32	5,14
			1,6 mm	25,46	27,64	2,18
			2 mm	22,59	23,47	0,88
	R14	1,2 mm	29,47	33,85	4,38	
		1,6 mm	25,7	26,9	1,2	
		2 mm	22,83	21,94	-0,89	
	R6	15	1,2 mm	35,46	37,3	1,84
			1,6 mm	32,9	34,74	1,84
			2 mm	30,56	30,9	0,34
	R8		1,2 mm	33,44	40	6,56
			1,6 mm	32,18	38,04	5,86
			2 mm	30,59	31,22	0,63
	R10		1,2 mm	36,59	41,36	4,77
			1,6 mm	31,93	37,5	5,57
			2 mm	30,16	30,9	0,74
	R12		1,2 mm	33,7	40	6,3
			1,6 mm	32,77	33,27	0,5
			2 mm	30,17	32,31	2,14
R14	1,2 mm	37,19	39,23	2,04		
	1,6 mm	32,94	34,55	1,61		
	2 mm	30,41	32,21	1,8		

**Ek-11 DP600 Kalitesindeki Sacların Parametrelere Göre Sayısal ve Deneysel Ölçümleri ve Farkları**

MALZEME	YARIÇAP	KALIP AÇIKLIĞI	KALINLIK	Sayısal (mm)	Deneysel (mm)	Fark (mm)
DP600	R6	5	1,2 mm	32,5	34,3	1,8
			1,6 mm	25,17	26,35	1,18
			2 mm	21,25	20,48	-0,77
	R8		1,2 mm	27,3	26,9	-0,4
			1,6 mm	22,55	25,29	2,74
			2 mm	18,81	18,76	-0,05
	R10		1,2 mm	27,74	31	3,26
			1,6 mm	23,07	24,25	1,18
			2 mm	18,75	19,72	0,97
	R12		1,2 mm	30,33	34,82	4,49
			1,6 mm	23,7	24,04	0,34
			2 mm	18,55	17,32	-1,23
	R14	1,2 mm	30,34	24,45	-5,89	
		1,6 mm	22,68	22,33	-0,35	
		2 mm	18,69	17,42	-1,27	
	10	R6	1,2 mm	37,15	39,1	1,95
			1,6 mm	32,03	33,12	1,09
			2 mm	27,77	27,06	-0,71
		R8	1,2 mm	34,06	40	5,94
			1,6 mm	29,86	31,73	1,87
			2 mm	25,59	26,74	1,15
		R10	1,2 mm	36,28	41,38	5,1
			1,6 mm	30,9	29,62	-1,28
			2 mm	26,73	26,01	-0,72
		R12	1,2 mm	37,32	39,55	2,23
			1,6 mm	31,95	32,15	0,2
			2 mm	26,71	24,95	-1,76
	R14	1,2 mm	36,83	37,78	0,95	
		1,6 mm	31,43	25,68	-5,75	
		2 mm	25,39	25,81	0,42	
	15	R6	1,2 mm	43,13	45,5	2,37
			1,6 mm	37,45	41,32	3,87
			2 mm	34,88	35,78	0,9
		R8	1,2 mm	41,6	45,8	4,2
			1,6 mm	38,05	39,3	1,25
			2 mm	33,39	33,85	0,46
R10		1,2 mm	43,25	46,34	3,09	
		1,6 mm	38,68	38,15	-0,53	
		2 mm	33,68	35,1	1,42	
R12		1,2 mm	44,1	44,9	0,8	
		1,6 mm	38,51	36,98	-1,53	
		2 mm	34,38	35,6	1,22	
R14	1,2 mm	44,05	45,69	1,64		
	1,6 mm	38,44	41,96	3,52		
	2 mm	34,58	34,13	-0,45		



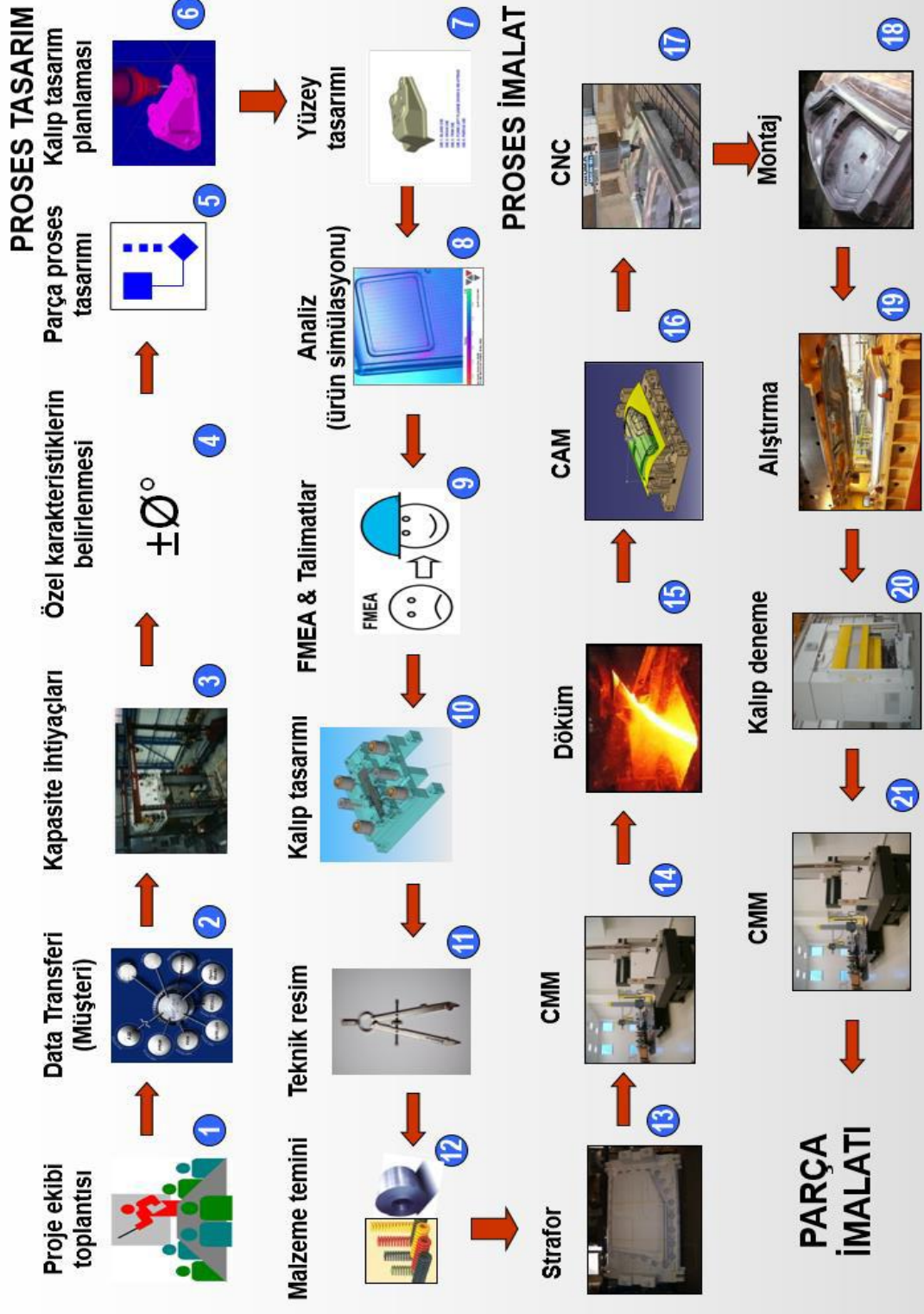
**Ek-12 DP800 Kalitesindeki Sacların Parametrelere Göre Sayısal ve Deneysel Ölçümleri ve Farkları**

MALZEME	YARIÇAP	KALIP AÇIKLIĞI	KALINLIK	Sayısal (mm)	Deneysel (mm)	Fark (mm)
DP800	R6	5	1,2 mm	42	43,52	1,52
			1,6 mm	34,01	35,13	1,12
			2 mm	26,65	27,09	0,44
	R8		1,2 mm	40,19	42,92	2,73
			1,6 mm	31,19	33,23	2,04
			2 mm	25,32	26,72	1,4
	R10		1,2 mm	37,6	39,2	1,6
			1,6 mm	32,77	32,68	-0,09
			2 mm	25,01	24,7	-0,31
	R12		1,2 mm	36,8	39,46	2,66
			1,6 mm	29,91	29,12	-0,79
			2 mm	24,08	24,77	0,69
	R14	1,2 mm	22,35	24,5	2,15	
		1,6 mm	30,25	27,34	-2,91	
		2 mm	23,86	22,53	-1,33	
	10	R6	1,2 mm	46,1	48,8	2,7
			1,6 mm	39,07	39,74	0,67
			2 mm	32,64	34,56	1,92
		R8	1,2 mm	40,1	42,25	2,15
			1,6 mm	39,05	38,83	-0,22
			2 mm	32,33	32,83	0,5
		R10	1,2 mm	44,32	46,01	1,69
			1,6 mm	37,88	35,32	-2,56
			2 mm	31,84	32,8	0,96
		R12	1,2 mm	43,13	45,6	2,47
			1,6 mm	38,19	40,13	1,94
			2 mm	32,05	31,81	-0,24
	R14	1,2 mm	41,38	44,33	2,95	
		1,6 mm	37,38	36,64	-0,74	
		2 mm	31,5	31,42	-0,08	
	15	R6	1,2 mm	48,5	53	4,5
			1,6 mm	46,45	45,36	-1,09
			2 mm	40	42,25	2,25
		R8	1,2 mm	45,95	50	4,05
			1,6 mm	43,51	47,89	4,38
			2 mm	37,91	41,07	3,16
R10		1,2 mm	49,4	52,75	3,35	
		1,6 mm	45,61	47,17	1,56	
		2 mm	38,57	38,09	-0,48	
R12		1,2 mm	50,6	55,11	4,51	
		1,6 mm	44,13	45,98	1,85	
		2 mm	38,7	39,76	1,06	
R14	1,2 mm	49,99	49,81	-0,18		
	1,6 mm	43,62	45,72	2,1		
	2 mm	38,09	36,6	-1,49		

**Ek-13 DP1000 Kalitesindeki Sacların Parametrelere Göre Sayısal ve Deneysel Ölçümleri ve Farkları**

MALZEME	YARIÇAP	KALIP AÇIKLIĞI	KALINLIK	Sayısal (mm)	Deneysel (mm)	Fark (mm)
DP1000	R6	5	1,2 mm	55,6	53,8	-1,8
			1,6 mm	49,45	47,95	-1,5
			2 mm	38,29	34,94	-3,35
	R8		1,2 mm	52,5	51,5	-1
			1,6 mm	46,63	45,21	-1,42
			2 mm	39,12	37,32	-1,8
	R10		1,2 mm	54,5	52	-2,5
			1,6 mm	45,35	33,09	-12,26
			2 mm	37,88	29,46	-8,42
	R12		1,2 mm	53,36	49,44	-3,92
			1,6 mm	43,96	40,72	-3,24
			2 mm	36,17	31,95	-4,22
	R14	1,2 mm	49,99	46,46	-3,53	
		1,6 mm	43,77	34,53	-9,24	
		2 mm	34,11	31,13	-2,98	
	10	R6	1,2 mm	58,2	58,48	0,28
			1,6 mm	53,57	50,7	-2,87
			2 mm	45,23	42,96	-2,27
		R8	1,2 mm	58,45	57,63	-0,82
			1,6 mm	54,39	52,99	-1,4
			2 mm	46,19	44,93	-1,26
		R10	1,2 mm	58,58	56	-2,58
			1,6 mm	52,3	42,49	-9,81
			2 mm	44,43	44,27	-0,16
		R12	1,2 mm	55,31	56,02	0,71
			1,6 mm	51,27	49,46	-1,81
			2 mm	43,3	42,05	-1,25
	R14	1,2 mm	54,95	53,64	-1,31	
		1,6 mm	50,19	46,99	-3,2	
		2 mm	41,2	38,47	-2,73	
	15	R6	1,2 mm	64	63,5	-0,5
			1,6 mm	60,19	55,68	-4,51
			2 mm	53,15	50,14	-3,01
		R8	1,2 mm	63,7	63,6	-0,1
			1,6 mm	57,78	56,19	-1,59
			2 mm	50,12	51,08	0,96
		R10	1,2 mm	62,43	59,76	-2,67
			1,6 mm	57,72	53,68	-4,04
			2 mm	51,17	50,34	-0,83
		R12	1,2 mm	60,35	57,27	-3,08
			1,6 mm	55,41	55,62	0,21
			2 mm	51,31	46,11	-5,2
R14	1,2 mm	61,82	60,99	-0,83		
	1,6 mm	58,03	54,85	-3,18		
	2 mm	50,16	49,79	-0,37		

Ek-14 Kalıp Proses ve Tasarımında Kullanılan Genel İşleyiş



## ÖZGEÇMİŞ

### Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : TUNALI Berna  
Doğum tarihi ve yeri : 11.11.1991 / Bursa  
e-mail : [berna.tunali@hotmail.com](mailto:berna.tunali@hotmail.com)

### Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	Dumlupınar Üniversitesi / Makine Mühendisliği	2019
Lisans	Anadolu Üniversitesi / İşletme	2017
Lisans	Dumlupınar Üniversitesi / Makine Mühendisliği	2014
Lisans	Universidad Castilla La Mancha / Erasmus	2013-Bahar
Lise	Hasan Ali Yücel Lisesi / Fen Bilimleri	2009

### İş Denevimi

Yıl	Yer	Görev
2015-2016	Çinigaz Doğalgaz Dağıtım	Proje Kontrol Uzmanı
2016-...	Beyçelik Gestamp Teknoloji ve Kalıp Merkezi	Proses Tasarım Uzmanı

**Yabancı Dil** İngilizce, İspanyolca